



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA (CAR) UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE  
DOSAGEM**

Laura Kunze Kehl

Lajeado, novembro de 2017

Laura Kunze Kehl

**AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA (CAR) UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE  
DOSAGEM**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, novembro de 2017

Laura Kunze Kehl

**AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA (CAR) UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE  
DOSAGEM**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil:

Prof. Me. Rafael Mascolo – orientador  
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz  
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Prof. Me. Ivandro Carlos Rosa  
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Lajeado, 05 de dezembro de 2017

## RESUMO

As vantagens da utilização do concreto de alta resistência (CAR) têm sido abordadas por diversos pesquisadores pois, apesar da mistura ter custo elevado, se comparada à mistura de concreto convencional, a diminuição de custos com fôrmas, mão-de-obra e armadura, a redução da seção de pilares e vigas, das cargas das fundações, assim como, o aumento da durabilidade das estruturas, torna a utilização do CAR potencialmente mais vantajosa economicamente. Os materiais componentes da dosagem do CAR estão disponíveis no mercado, basta que suas propriedades sejam estudadas pelos engenheiros para que sejam utilizados conscientemente. Porém, os métodos de dosagem de concreto utilizados para misturas convencionais não são aplicáveis para todos os tipos de concreto, tornando inviável economicamente dosar as misturas de CAR através de métodos para concretos convencionais. Este fator motivou vários pesquisadores à desenvolverem métodos de dosagem diferentes, buscando um maior custo-benefício para cada situação de projeto. Essa monografia tem como objetivo dosar concretos de alta resistência através de métodos específicos propostos por três grupos de pesquisadores e comparar o custo do metro cúbico para as classes de resistência determinadas. Através da caracterização dos materiais e da mistura no estado fresco e endurecido, elaborou-se o diagrama de dosagem e a partir deste, determinou-se o traço final para cada classe de resistência. O estudo teve como resultado a avaliação de custos entre as misturas dosadas por cada método para as diferentes classes de resistências, sendo verificado que o Método IPT/EPUSP Modificado se apresentou mais eficiente economicamente, seguido do método Mehta-Aïtcin e o menos econômico sendo o método Aïtcin.

**Palavras-chave:** Concreto de alta resistência. Métodos de dosagem. Avaliação de custos.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento.....	21
Figura 2 - Micrografia de partículas de cimento sem aditivo (a) e com aditivo superplastificante (b) .....	27
Figura 3 - Comparação entre diâmetro de partículas de cimento Portland, cinza volante e sílica ativa .....	28
Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento das etapas do trabalho .....	39
Figura 5 - Ponto de saturação do aditivo.....	46
Figura 6 - Curvas de compatibilidade e incompatibilidade cimento-superplastificante .....	47
Figura 7 - Tipos de ruptura de corpos-de-prova .....	63
Figura 8 - Ruptura cônica (a); cimento anidro no interior do CP (b); e plano de ruptura se propagando através das partículas do agregado (c). .....	64
Figura 9 - Diagrama de dosagem.....	72

### **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Curva das massas unitárias das misturas de brita .....	41
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	44
Gráfico 3 - Ponto de saturação do aditivo .....	46
Gráfico 4 - Compatibilidade cimento-superplastificante .....	48

Gráfico 5 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Aïtcin .....	65
Gráfico 6 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Aïtcin .....	67
Gráfico 7 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Mehta-Aïtcin .....	67
Gráfico 8 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Mehta-Aïtcin .....	69
Gráfico 9 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método IPT/EPUSP Modificado .....	70
Gráfico 10 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método IPT/EPUSP Modificado .....	71
Gráfico 11 - Teor de aditivo .....	75
Gráfico 12 – Custo por m <sup>3</sup> em função da resistência à compressão .....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de dosagem em função da trabalhabilidade, resistência e custo .....	33
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das misturas das britas.....	41
Tabela 2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	42
Tabela 3 - Massas específicas e absorção do agregado graúdo .....	42
Tabela 4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	43
Tabela 5 - Massas específicas e absorção do agregado miúdo .....	44
Tabela 6 - Massa específica e teor de sólidos do aditivo .....	48
Tabela 7 - Identificação dos concretos .....	50
Tabela 8 - Planilha de dosagem para 1m <sup>3</sup> de concreto – Método Aïtcin .....	51
Tabela 9 - Traço unitário (1: a: p: a/agl.) – Método Aïtcin .....	52
Tabela 10 - Quantidade de material para execução do concreto – Método Aïtcin ....	52
Tabela 11 - Distribuição do volume de pasta (m <sup>3</sup> ).....	53
Tabela 12 - Relação agregado graúdo : miúdo .....	54
Tabela 13 - Planilha de dosagem para 1m <sup>3</sup> de concreto – Método Mehta-Aïtcin .....	54
Tabela 14 - Traço unitário (1: a: p: a/agl.) – Método Mehta-Aïtcin .....	55
Tabela 15 - Quantidade de material para execução do concreto – Método Mehta-Aïtcin .....	55
Tabela 16 - Traço unitário (1: a: p: a/agl.) – Método IPT/EPUSP Modificado .....	56
Tabela 17 - Planilha de dosagem para 1m <sup>3</sup> de concreto – Método IPT/EPUSP Modificado .....	57
Tabela 18 - Quantidade de material para execução do concreto – Método IPT/EPUSP Modificado .....	57
Tabela 19 - Abatimento do concreto .....	59
Tabela 20 - Massa específica aparente do concreto.....	59

Tabela 21 - Resistência à compressão – Método Aïtcin .....	61
Tabela 22 - Resistência à compressão – Método Mehta-Aïtcin .....	62
Tabela 23 - Resistência à compressão – Método IPT/EPUSP Modificado .....	62
Tabela 24 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Aïtcin....	66
Tabela 25 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Mehta-Aïtcin .....	68
Tabela 26 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método IPT/EPUSP Modificado .....	70
Tabela 27 - Traços unitários finais (1: a: p: a/agl.) .....	73
Tabela 28 - Dosagem para 1m <sup>3</sup> de concreto – Método Aïtcin .....	74
Tabela 29 - Dosagem para 1m <sup>3</sup> de concreto – Método Mehta-Aïtcin .....	74
Tabela 30 - Dosagem para 1m <sup>3</sup> de concreto – Método IPT/EPUSP Modificado .....	74
Tabela 31 - Teor de aditivo.....	76
Tabela 32 - Custo dos materiais.....	76
Tabela 33 - Custo por m <sup>3</sup> por classe de resistência .....	77



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 Objetivos.....	11
1.2 Delimitações.....	12
1.3 Estrutura .....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 Concreto de alta resistência .....	14
2.1.1 Definição.....	16
2.1.2 Aplicações .....	18
2.2 Microestrutura do concreto .....	19
2.2.1 Fase agregado.....	19
2.2.2 Pasta de cimento .....	20
2.2.3 Zona de transição .....	21
2.3 Materiais .....	22
2.3.1 Cimento Portland .....	22
2.3.2 Agregados .....	24
2.3.3 Água .....	25
2.3.4 Aditivos e adições .....	26
2.4 Propriedades do concreto.....	29
2.4.1 Propriedades no estado fresco .....	29
2.4.2 Propriedades no estado endurecido.....	30
2.5 Métodos de dosagem de concreto de alta resistência .....	32
2.5.1 Métodos baseados no volume absoluto .....	34
2.5.2 Métodos baseados na otimização do esqueleto granular.....	35
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>38</b>
3.1 Materiais .....	39
3.1.1 Cimento Portland .....	40
3.1.2 Agregados .....	40
3.1.3 Adição mineral.....	45
3.1.4 Aditivo químico .....	45
3.2 Métodos .....	49
3.2.2 Aplicação dos métodos e determinação do traço inicial.....	50

3.2.3 Caracterização do concreto no estado fresco .....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1 Caracterização do concreto no estado endurecido .....	60
4.1.1 Ruptura.....	62
4.1.2 Análise dos resultados .....	64
4.2 Diagrama de dosagem e determinação do traço final .....	71
4.2.4 Teor de aditivo para o traço final .....	75
4.3 Custo dos materiais componentes.....	76
4.4 Custo do concreto.....	77
5 CONCLUSÕES .....	79
REFERÊNCIAS.....	81

## 1 INTRODUÇÃO

A Norma Brasileira (NBR) 12655/2015, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define que um concreto é de alta resistência quando sua resistência à compressão aos 28 dias for superior à 50 MPa. De acordo com Aïtcin (1998), até a década de 1960, os concretos produzidos resistiam de 15 a 30 MPa, o que era considerado satisfatório pelos engenheiros da época. Atualmente, o concreto de alta resistência (CAR) com valores condizentes com a norma, são produzidos e há uma crescente utilização em obras especiais (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os materiais utilizados na composição de uma mistura de CAR têm grande influência nas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Os princípios fundamentais para iniciar a dosagem desse tipo de concreto é a obtenção do máximo rendimento de cada componente da mistura e a obtenção de materiais que exijam a menor quantidade de água, prevendo alcançar a máxima resistência e a maior consistência possível, considerando os custos (ALVES, 2000). As propriedades requeridas para a produção de um concreto de alto desempenho, para que se atinja uma elevada resistência, são a baixa permeabilidade e a elevada durabilidade, que são obtidas através de uma redução da relação água/cimento, da utilização de adições, aditivos e agregados de boa qualidade (OLIVEIRA, 2012).

Os métodos utilizados para dosagem de concretos convencionais não são aplicáveis para todos os tipos de concretos. A demanda por concretos com maiores valores de resistência à compressão, fez com que vários pesquisadores, ao longo dos anos, desenvolvessem métodos de dosagem diferentes e específicos para esse tipo

de concreto, buscando um melhor custo-benefício para cada situação de projeto. De acordo com Cremonini et al. (2001), os métodos utilizados para dosagem de concreto convencional (CC) são considerados inapropriados para dosar CAR, pois não haveria um correto proporcionamento de materiais, tendo em vista que estes métodos não consideram o uso de aditivos, adições e a baixa relação água/cimento que a produção do CAR exige, o que inviabilizaria a dosagem, por gerar um excessivo consumo de cimento.

O presente trabalho aborda o processo de dosagem de CAR através de três métodos específicos, para três níveis de resistência. São apresentados os resultados dos ensaios realizados para caracterização dos componentes e da mistura no estado fresco e endurecido. Com os resultados obtidos, elaborou-se o diagrama de dosagem, para a determinação do traço final para cada classe de resistência estipulada. A partir das curvas, pode-se determinar o consumo de cimento e, conseqüentemente, o consumo dos demais materiais. Com base na composição de custo dos materiais, o resultado final apresenta a avaliação de custos do metro cúbico dos concretos dosados por cada método.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral do trabalho é verificar qual método de dosagem para concretos de alta resistência apresenta o menor custo do metro cúbico do concreto, por classe de resistência.

Os objetivos específicos são:

- a) caracterizar as misturas em estado fresco;
- b) caracterizar as misturas no estado endurecido quanto à resistência mecânica à compressão;
- c) caracterizar os materiais componentes da mistura (aglomerantes, adição e agregados);
- d) montar curvas de dosagem para cada método utilizado.

## **1.2 Delimitações**

Foram dosados concretos de alta resistência através de três métodos de dosagem, sendo estes Aïtcin (1998), Mehta-Aïtcin (1990b) e IPT/EPUSP Modificado (2001), em que buscou-se atingir as resistências à compressão de 60, 80 e 100 MPa. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais componentes, de consistência e de resistência mecânica à compressão da mistura. A etapa experimental realizou-se no Laboratório de Tecnologia da Construção – LATEC, na UNIVATES e se delimitou a utilização do cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), pedra de granito britada nº 1 e 0 como agregado graúdo, areia média como agregado miúdo, aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico e sílica ativa como adição, prevendo que se encontrassem resultados que pudessem ser comparados para atender aos objetivos.

## **1.3 Estrutura**

Esta monografia está estruturada em seis capítulos, sendo que no primeiro capítulo é apresentada uma introdução sobre a importância do tema, são expostos os objetivos do estudo e apresentadas as delimitações da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre o tema, sendo descrito o histórico, a definição de acordo com normas e autores e as vantagens sobre as aplicações do concreto de alta resistência. São apresentados os materiais que compõem a dosagem deste e apresentadas suas características, bem como, as principais propriedades da mistura, no estado fresco e endurecido. Após, são apresentados seis métodos de dosagem e seus princípios.

No terceiro capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos aplicados, a escolha dos materiais e os resultados dos ensaios de caracterização. São definidos os métodos e abordada sua aplicação, como consequência, é apresentado o traço inicial de dosagem. Este capítulo abrange ainda, a caracterização da mistura no estado fresco.

No quarto capítulo são apresentados os resultados da caracterização da mistura no estado endurecido e a análise dos resultados obtidos neste ensaio. São

apresentados ainda, o diagrama de dosagem e, conseqüentemente, a definição do traço final para as classes de resistência determinadas. É apresentado o custo dos materiais e os resultados do custo do metro cúbico de concreto, dosados a partir dos diferentes métodos.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões acerca dos resultados da realização deste trabalho e, no sexto capítulo, são apresentadas as referências utilizadas na elaboração do mesmo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Concreto de alta resistência**

O termo “alta resistência” não possui apenas uma definição, pois os valores variam de acordo com o local e época, considerando os materiais disponíveis (FLOR, 1994). As pesquisas para produção de CAR se iniciaram no final da década de 1950, com base em materiais cerâmicos, em que se observou que a dimensão reduzida dos materiais componentes aumentava a resistência (GJORV, 2008). Até a década de 1960, os concretos produzidos resistiam de 15 a 30 MPa, o que era considerado satisfatório pelos engenheiros da época, pois não imaginavam que o concreto poderia ser mais utilizado para construção do que o aço e que apenas servia para fundações ou proteção de estruturas contra incêndio (AÏTCIN, 1998). No final da década de 1960 iniciou-se a produção do CAR, na cidade de Chicago, nos Estados Unidos da América (FREEDMAN apud AÏTCIN, 1998). Na década de 1970, diversas edificações já utilizavam o CAR nessa cidade (FLOR, 1994). Em um período de 10 anos, as estruturas nessa cidade foram sendo projetadas com concretos cada vez mais resistentes, chegando de 45 a 60 MPa (AÏTCIN, 1998). Considerando o desenvolvimento de novos produtos para serem usados como componentes do concreto e a evolução dos métodos de dosagem, pode-se obter melhoria das propriedades do concreto e aumento da resistência (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

No início da década de 1970, os concretos produzidos não ultrapassavam uma resistência à compressão de 60 MPa, pois não havia a possibilidade de utilização de outros materiais e os redutores de água existentes não tinham capacidade de reduzir

mais a relação água/aglomerante (BLICK; PETERSEN; WINTER apud AİTCIN, 1998). Neste período, foram desenvolvidos os aditivos redutores de água de alto desempenho (superplastificantes), surgindo a possibilidade de produção de concretos com alta resistência e elevada trabalhabilidade, ou seja, possibilitando aumentar a resistência da mistura, através da diminuição da quantidade de água e da relação água/cimento, sem que houvesse perda de trabalhabilidade (GJORV, 2008). O desenvolvimento desse aditivo químico que permite reduzir a relação água/cimento, gerando um aumento da resistência mecânica e possibilitando a aplicação em edifícios altos e pontes com grandes vãos a serem vencidos, tornou-se uma alternativa econômica se considerado o benefício de redução de aço, fôrmas e mão-de-obra, mesmo considerando que aumente o consumo de cimento e teor de pasta da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Apesar do consumo de cimento, adições e aditivo elevar o custo da mistura, a utilização do CAR se torna viável economicamente, com base no aumento da capacidade de carga dos pilares e na diminuição da seção dos mesmos, assim como, considerando a redução da seção dos elementos estruturais e do peso-próprio de pontes (FLOR, 1994).

Bache (apud AİTCIN, 1998) produziu um concreto em escala laboratorial, onde reduziu a relação água/aglomerante a 0,16 utilizando grande dosagem de superplastificante e, além do cimento, adicionou um componente mais fino, a sílica ativa, obtendo após cura especial, uma resistência à compressão de 280 MPa. De acordo com Aİtcin (1998), no início da década seguinte, motivados pelas descobertas de Bache, a respeito dos efeitos positivos da utilização da sílica ativa como material suplementar na dosagem de concretos de alta resistência, houve um esforço de diversos países para que fossem realizadas pesquisas sobre o tema, fazendo com que as suas vantagens fossem reconhecidas.

Em 1990, cinquenta e sete dos cem edifícios mais altos eram construídos apenas de aço e, em 2014, o número de edifícios construídos apenas com estruturas metálicas era de somente vinte e quatro, diminuição que pode ser justificada, dentre outros fatores, pela disponibilidade de materiais e elevada velocidade de construção das estruturas de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O desenvolvimento de aditivos, ao mesmo tempo da disponibilidade de adições, proporcionou um grande avanço na produção de concretos com resistências elevadas (GJORV, 2008).



Atualmente, o edifício mais alto do mundo, com 828 metros de altura em 162 andares, é o Burj Khalifa, nos Emirados Árabes Unidos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). De acordo com o trabalho realizado por Bache (apud AÏTCIN, 1998) além da qualidade, quantidade e eficiência dos materiais cimentícios, a compactação e a porosidade são características que quando modificadas, alteram a resistência do concreto. Para o projeto do Edifício Burj Khalifa, previu-se baixa permeabilidade e alta durabilidade, sendo dosados concretos de alto desempenho de 60 e 80 MPa, compostos de cimento Portland, cinza volante, sílica ativa e agregados da região; ainda, a estrutura de concreto armado foi combinada com estrutura metálica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### 2.1.1 Definição

A NBR 8953/2015, da ABNT, faz a divisão do concreto para fins estruturais em classes de resistência com valores múltiplos de 5, onde no grupo I, enquadram-se concretos com resistência à compressão entre 20 e 50 MPa e, no grupo II, enquadram-se quando a resistência for de 55 a 100 MPa. A NBR 6118/2014, da ABNT, aplica-se às estruturas de concreto do grupo I e II, conforme essa classificação, sendo aplicada no segundo grupo para concretos de até 90 MPa. A NBR 12655/2015, da ABNT, define que o concreto é de alta resistência quando sua resistência à compressão é superior a 50 MPa, sendo então enquadrada no grupo II da NBR 8953/2015, da ABNT.

O relatório do *Committee 363/1992*, do *American Concrete Institute* (ACI), definiu que os concretos que tenham especificado resistências à compressão de 41 MPa ou mais, são considerados de alta resistência. De acordo com a revisão do relatório do *Committee 363/2010*, do ACI, a resistência dos concretos tem se desenvolvido gradualmente ao longo dos anos, dependendo não apenas do momento, mas do local. Na década de 1950, o concreto com resistência à compressão de 34 MPa era considerado de alta resistência, sendo que, uma década mais tarde, já se produzia concretos com resistência entre 41 e 52 MPa e, no início da década de 1970, produziu-se um concreto com 62 MPa, ao mesmo tempo em que se iniciava a demanda da utilização do CAR em edifícios altos. Conforme o *Committee 363/2010*, do ACI, atualmente, concretos com resistência de 138 MPa já são utilizados em

edifícios e é provável que a resistência continue aumentando, conforme a tecnologia dos materiais e os processos de dosagem e produção evoluem.

Gambhir (apud RANA; TIWARI; SRIVASTAVA, 2016), sugeriu a classificação dos concretos de alto desempenho conforme os níveis de resistência à compressão característica aos 28 dias, sendo considerado concreto comum, o de resistência na faixa de 10 a 20 MPa; normal, o de resistência entre 25 a 55 MPa; de alto desempenho, o de 60 a 100 MPa; de ultra-alto desempenho, o de 100 a 150 MPa; e, concreto excepcional, o de resistência superior a 150 MPa. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que concretos podem ser classificados de acordo com a resistência à compressão, através de três categorias, os concretos de baixa, média e de alta resistência. Na primeira categoria se enquadram os concretos para fins não-estruturais, na segunda categoria, consideram-se os concretos normais, que também são chamados de convencionais, sendo o mais utilizado para obras com fins estruturais e, a terceira, os de alta resistência, que são largamente utilizados para aplicações especiais, como edifícios altos e pontes. Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), os concretos que tenham a resistência à compressão, aos 28 dias de idade, menor que 50 MPa são considerados concretos convencionais (CC) e, os que superam os 50 MPa são considerados concretos de alta resistência (CAR), apesar da quantificação de alta resistência depender do tempo em que ocorre.

Uma mistura com baixa porosidade e alta densidade, aumenta o desempenho do concreto de maneira geral, não somente em relação à resistência, mas à durabilidade, por isso o surgimento do termo “concreto de alto desempenho” (GJORV, 2008). De acordo com Oliveira (2012), o alto desempenho de um concreto considera sempre, além de outras características, a alta resistência. Conforme Neville e Brooks (2013), o concreto de alto desempenho (CAD) tem suas propriedades relacionadas a uma maior durabilidade, baixa permeabilidade e alta resistência. Apesar disso, o parâmetro “desempenho” não pode ser perfeitamente especificado, deixando dúvidas a respeito do significado desse termo e fazendo com que não haja um consenso entre pesquisadores (GJORV, 2008). Por esse motivo, Aïtcin (1998) tratou o CAR como CAD, considerando que, o que se pode esperar de um concreto não é apenas a alta resistência e que a utilização do CAR não significa apenas que se tem um concreto com resistência à compressão elevada, mas também uma elevada durabilidade.

### 2.1.2 Aplicações

Sabe-se que o custo por metro cúbico do concreto convencional (CC) é significativamente menor que o do CAR, pois no segundo há necessidade de acrescentar aditivos e adições, além do maior consumo de cimento. Quando considerado o fator econômico, ou seja, quando comparado o custo-benefício dos mesmos, o CAR torna-se possivelmente mais vantajoso, pois além de apresentar benefícios ecológicos e energéticos através da utilização de resíduos industriais, há redução do consumo de fôrmas, de aço e de mão-de-obra (CREMONINI et al., 2001). Dal Molin e Wolf (1990) realizaram um estudo através de uma análise que considerou custos com concreto, aço, fôrmas e mão-de-obra, no qual concluíram que há possibilidade de economia de aproximadamente 12% se utilizado CAR (com resistência à compressão de 60 MPa) em relação a utilização do CC (com resistência à compressão de 21 MPa).

As aplicações desse concreto têm aumentado em muitas partes do mundo, através dos resultados de desenvolvimentos na área de tecnologia de materiais e por conta da demanda por concretos de maiores resistências (ACI 363/2010). Com o avanço na área de tecnologia do concreto e o entendimento dos efeitos positivos de se adicionar outros materiais aos já utilizados, tem-se a possibilidade de aumentar a resistência das estruturas de concreto, através da incorporação de adições minerais e aditivos químicos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Em edifícios, isso pode significar um aumento na área útil dos pavimentos pela diminuição do número de pilares ou pela diminuição da sua seção, se tornando mais esbeltos. Com a diminuição da espessura da laje, em edifícios altos e com muitos pavimentos, isso pode representar o ganho de mais um, além de se tornar esteticamente mais atrativo. Com a diminuição da seção de vigas, pode-se haver um maior aproveitamento do pavimento pelo aumento da altura útil, além de tornar as vigas mais discretas (AÏTCIN, 1998). A disponibilidade do CAR pode representar economia na construção de edifícios com mais de trinta andares, através da execução de pilares mais esbeltos nos dois terços inferiores do edifício, enquanto no terço superior pode-se manter pilares com tamanho normal com a utilização de CC (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Cremonini et al. (2001) citam ainda, além do aumento do espaço útil nos pavimentos inferiores, a diminuição de deformações e cargas nas

fundações, além de melhora na durabilidade das estruturas. Em pontes, pode representar a diminuição da quantidade de vigas, possibilitando um maior vão; e elementos estruturais mais esbeltos, que podem se integrar ao entorno sem modificar a paisagem do local (AİTCIN, 1998; NEVILLE; BROOKS, 2013).

A utilização do CAR pode representar redução do fissuramento e da retração, além do peso próprio da estrutura, pela diminuição da quantidade de aço. Além disso, há o aumento da rigidez transversal, o que reduz o efeito das cargas geradas pelo vento, diminuindo o desconforto dos ocupantes (AİTCIN, 1998). Conforme Khadiranaikar (apud RANA; TIWARI; SRIVASTAVA, 2016), a utilização do CAR reduz os ruídos, as vibrações e o custo, tanto em pontes quanto em edifícios.

## **2.2 Microestrutura do concreto**

A estrutura de um concreto de alta resistência analisada microscopicamente, permite visualizar diferentes fases no concreto. A primeira fase é a estrutura do agregado, a segunda, a hidratação da pasta de cimento e, a terceira, a zona de transição que é a interface entre o agregado e a pasta hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### **2.2.1 Fase agregado**

Essa fase é responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional, as quais dependem principalmente da resistência e densidade do agregado, que são determinadas principalmente por características físicas, como volume, tamanho e distribuição dos poros. A dimensão e a forma do agregado têm influência indireta na resistência, pois quanto mais alongadas e achatadas, maior será a tendência de acumular água na sua superfície, o que enfraquece a zona de transição (SILVA, 2013).

### 2.2.2 Pasta de cimento

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), além das alterações químicas sofridas quando o cimento entra em contato com a água, deve-se considerar as propriedades reológicas da pasta de cimento no estado fresco, que influenciam também as propriedades no estado endurecido. A hidratação da pasta de cimento apresenta a fase dos sólidos e dos vazios (ou poros).

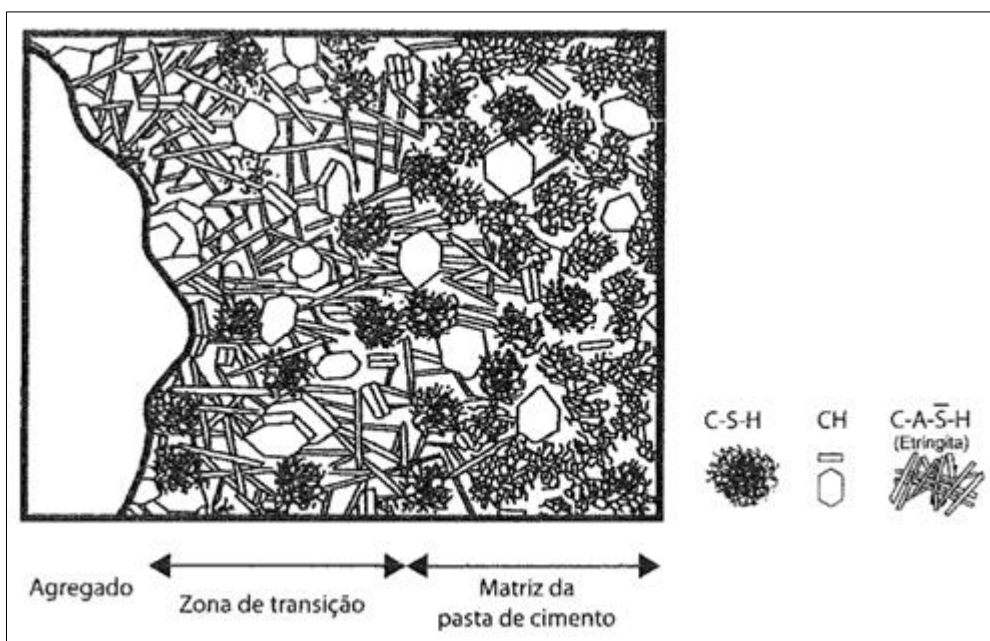
A fase dos sólidos dentro da pasta de cimento hidratada é formada por silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que fornece resistência e durabilidade, hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ), que se comparado com o C-S-H não apresenta uma potencial contribuição à resistência devido à área superficial ser menor e, em menores quantidades, apresenta sulfoaluminatos de cálcio ou “etringita” (SILVEIRA, 2004). Sabendo que esses componentes não tem a capacidade de se hidratarem com a mesma velocidade, dependendo do grau de hidratação e do tamanho das partículas do cimento, a pasta pode apresentar partículas de cimento anidro, que não se hidratam (SILVA, 2013).

A fase dos vazios representa os espaços da mistura que não foram preenchidos pelos sólidos, podendo ser vazios capilares, vazios de ar incorporado e espaço interlamelar. O espaço interlamelar apresenta poros muito pequenos e não apresenta efeitos significativos sobre a resistência e a permeabilidade, enquanto os vazios de ar incorporado apresentam grande porosidade, afetando negativamente a resistência do concreto (SILVA, 2013). O espaço ocupado pelo cimento e água antes da hidratação completa, passa a ser preenchido pelo produto da hidratação e, ao final da mesma, os espaços que não são ocupados, são chamados de vazios capilares, que podem ter seu volume e tamanho determinados através da relação água/cimento e grau de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A formação de poros torna o concreto mais permeável, o que influencia na resistência, pois através dos poros pode haver a percolação de gases e líquidos que podem ser prejudiciais (SILVEIRA, 2004). A relação entre porosidade e resistência é considerada independente de os vazios capilares estarem cheios de água ou não e, quanto maior for o grau de hidratação da pasta, menor será a porosidade (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### 2.2.3 Zona de transição

Segundo Neville e Brooks (2013), a zona de transição é a interface entre o agregado e a pasta de cimento hidratada, a qual apresenta uma maior porosidade e, por isso, a pasta que está nessa zona pode apresentar menor resistência. “A resistência da zona de transição pode aumentar com o tempo devido a reação secundária entre  $\text{CaOH}_2$  e pozolanas, como a sílica ativa [...]”. (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 119). Apesar dessa região ser constituída dos mesmos elementos da matriz da pasta, a estrutura e as propriedades nessa região são diferentes e a porosidade diminui conforme se afasta da superfície do agregado (GONDIM, 2005). A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da zona de transição entre o agregado e a matriz da pasta de cimento.

Figura 1 - Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Através da existência da zona de transição, o concreto chega no estado de ruptura em um nível inferior à ruptura dos seus componentes, que apresentam comportamento elástico até a ruptura, enquanto o concreto se mostra inelástico, pois como já existem microfissuras nesse local, não são requeridos grandes esforços para

que as mesmas aumentem. Quando o concreto é submetido a grandes esforços de compressão, apresenta um comportamento razoavelmente dúctil, pois as fissuras existentes no concreto se unem às fissuras da zona de transição e, quando submetido a pequenos esforços de tração, logo se mostra frágil, rompendo nesse ponto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para que sejam alcançados maiores valores de resistência, há a necessidade de controlar a pasta de cimento hidratada, especialmente na zona de transição e, para que isso ocorra, deve-se procurar, principalmente, manter a relação água/cimento baixa, para que haja uma consequente diminuição da porosidade. Além disso, pode-se fazer o uso de adições minerais, como a sílica ativa, que é capaz de reduzir a água livre que forma um filme entorno do agregado, pois preenche os vazios deixados pelas partículas de cimento próximos à superfície do agregado (ALVES, 2000).

## **2.3 Materiais**

Os materiais utilizados na composição de um concreto têm grande influência nas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido e as características particulares de cada um devem ser consideradas na etapa de escolha, principalmente para produção de concretos de alta resistência, pois existem muitos materiais disponíveis, com grande variedade nas composições e propriedades. Os princípios fundamentais para iniciar a dosagem desse tipo de concreto é a obtenção do máximo rendimento de cada componente da mistura e a obtenção de materiais que exijam a menor quantidade de água, prevendo alcançar a máxima resistência e a maior consistência possível, considerando os custos (ALVES, 2000).

### **2.3.1 Cimento Portland**

O cimento anidro não tem função aglomerante, adquirindo-a quando adicionada água, ocorrendo a hidratação do cimento, resultando em características de pega e endurecimento (PETRUCCI, 1998). Nessa reação química, as características estão relacionadas a alterações na matéria, variações da energia e velocidade de reação, ou seja, conhecer a reatividade do cimento é importante, pois somente o cimento, não

é um material aglomerante, mas os resultados da hidratação o tornam um; conhecer o calor liberado é importante pois dependendo da situação poderá ser favorável ou não; e, a velocidade de reação é o que governa o tempo de pega e endurecimento (BRUNAUER; COPELAND apud MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A finura do cimento está diretamente relacionada a velocidade da reação de hidratação, sendo que, o grau de hidratação afeta diretamente a porosidade e, indiretamente, a resistência do concreto. O cimento mais fino hidrata-se mais rapidamente, apresentando menor porosidade e consequentemente maior resistência, além de apresentar um aumento da trabalhabilidade e da coesão e uma diminuição da exsudação e da permeabilidade. Entretanto, há maior liberação de calor e consequentemente maior retração térmica, o que caracteriza um concreto com maior potencial de fissuração (HELENE; TERZIAN, 1992; PETRUCCI, 1998). Além disso, devem ser considerados limites para a finura do cimento. Partículas que apresentem dimensão maior que 45  $\mu\text{m}$  tem um processo de hidratação mais lento e, a hidratação em partículas com dimensão menor que 75  $\mu\text{m}$  pode não ocorrer (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A composição química dos componentes principais do cimento são o silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato bicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e ferro aluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Nas reações com a água, há o desenvolvimento de um estado estável de baixa de energia e com isso, há liberação de energia em forma de calor. Os compostos do cimento Portland não se hidratam na mesma velocidade e modificando as proporções de cada composto, pode-se alterar as características do desenvolvimento da resistência (PETRUCCI, 1998). A exemplo disso, pode-se citar que um cimento com maiores quantidades de  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{A}$  tem elevada resistência inicial e um com maiores quantidades de  $\text{C}_2\text{S}$  terá uma elevada resistência final e apresentará um endurecimento mais lento e baixa liberação de calor (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para utilização no concreto de alta resistência, quanto mais puro for o cimento, melhor. Durante a reação com a água, o clínquer se transforma em hidróxido de cálcio, que combinado com a sílica ativa, aumenta a resistência da mistura. Porém, quando o cimento possui adições incorporadas que substituem parte do clínquer, há uma menor geração de hidróxido de cálcio no processo de hidratação, gerando teores



insuficientes para reagir com a sílica ativa e gerar o ganho de resistência (ALVES, 2000).

### **2.3.2 Agregados**

A resistência dos agregados não é um fator determinante na resistência do concreto, mas características como textura superficial, forma, dimensão e granulometria influenciam na zona de transição e afetam a resistência do concreto (RANA; TIWARI; SRIVASTAVA, 2016). A natureza dos agregados interfere no comportamento do concreto e por este motivo as características físicas e químicas devem ser consideradas. Agregados britados ou com textura rugosa apresentam maior resistência em relação a agregados naturais ou lisos (HELENE; TERZIAN, 1992).

Deve haver um controle de qualidade em relação principalmente a granulometria e ao tamanho máximo do agregado, prevendo a menor demanda de água possível, com a utilização de agregados bem graduados (AÏTCIN, 1998). O módulo de finura está relacionado à área superficial de um agregado, através da qual ocorre alteração da água de molhagem para uma determinada consistência pois, quanto maior for o grão, menor será a demanda de água (HELENE; TERZIAN, 1992).

De acordo com Helene e Terzian (1992), a composição granulométrica de um agregado tem influência na compacidade e resistência. Mantendo constante uma relação água/cimento e uma dimensão máxima característica (DMC) do agregado, uma alteração na distribuição granulométrica pode alterar a resistência do concreto, a consistência e apresentar exsudação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 296), a composição granulométrica com agregados de duas dimensões tem influência positiva na quantidade de pasta de cimento necessária para preencher os vazios e, destacam que “na prática, baixos índices de vazios são obtidos quando se utilizam agregados graúdos de granulometria contínua combinados com proporções adequadas de areia graduada”.

### **2.3.2.1 Agregado graúdo**

A dimensão máxima característica (DMC) de um agregado graúdo está relacionada com a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, portanto, para um igual consumo de cimento e consistência, partículas maiores de agregados graúdos exigem menos água de amassamento, mas geram uma zona de transição mais fraca, que apresenta mais microfissuras. Concretos de alta resistência (com baixa relação água/cimento) tem menor porosidade na zona de transição e tem efeitos negativos quando ocorre o aumento da DMC dos agregados graúdos. Por esse motivo, normalmente, o tamanho máximo do agregado graúdo é de 19 milímetros (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### **2.3.2.2 Agregado miúdo**

Em concretos convencionais, existe a necessidade de utilizar areias mais finas para que se consiga alcançar uma trabalhabilidade para mistura. Em concretos de alta resistência, a utilização de areias mais grossas se deve, além do menor consumo de água, ao fato de que esse tipo de concreto já possui grandes quantidades de outros componentes que tem partículas mais finas que a areia, por conta do alto teor de cimento e da utilização de outros materiais cimentícios suplementares, como a sílica ativa. Se utilizada uma areia média, quanto mais próxima esta for do tamanho de uma areia grossa, melhor, tanto para a questão da resistência, quanto para a questão econômica (AÏTCIN, 1998).

### **2.3.3 Água**

A água de amassamento normalmente utilizada vem de redes de abastecimento e deve apresentar parâmetros de potabilidade. A presença de óleo, alga, sal ou açúcar na água de amassamento pode representar alteração no tempo de pega e na resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### **2.3.4 Aditivos e adições**

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que existe dois tipos de aditivos químicos, em que algumas substâncias podem agir no sistema cimento-água instantaneamente, enquanto outras, podem se desassociar e reagir entre os compostos do cimento e da água. Sobre a presença de adições, Mehta e Monteiro (2014, p. 306), afirmam que “o efeito físico [...] no comportamento reológico do concreto fresco se torna imediatamente aparente, mas pode levar de vários dias a vários meses para que os efeitos químicos na hidratação se manifestem”.

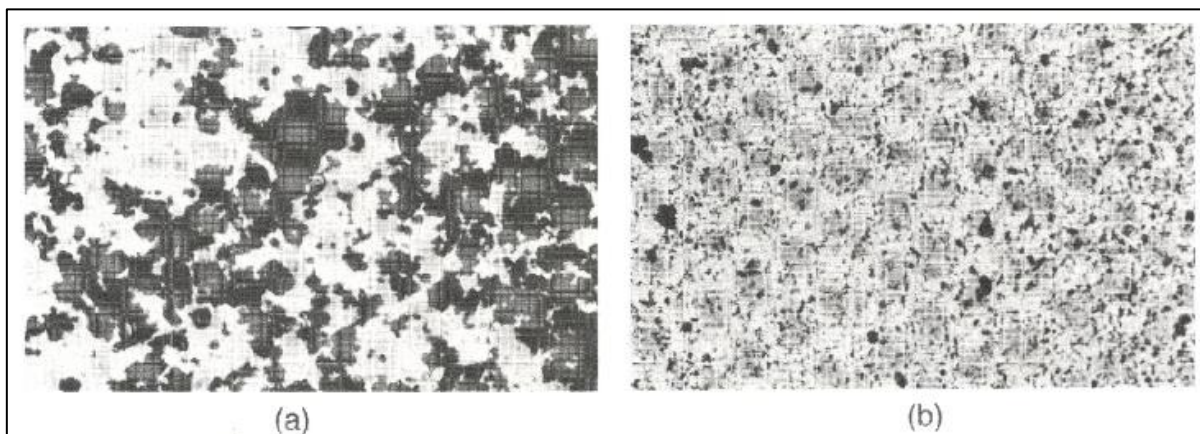
Os aditivos redutores de água têm capacidade de reduzir o consumo de água de uma mistura e manter uma dada consistência; a utilização de aditivos influencia positivamente na taxa de hidratação do cimento mantendo uma dada relação água/cimento (HELENE; TERZIAN, 1992). As adições são subprodutos pozolânicos e cimentícios da indústria que, quando substituem parte do cimento Portland, podem gerar uma redução da porosidade da matriz e da zona de transição, através da formação de silicato de cálcio, obtido por meio da reação dos componentes que, quando reagem com a água, formam hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

#### **2.3.4.1 Aditivos químicos**

Os aditivos superplastificantes são considerados redutores de água de alta eficiência, reduzindo de 30 a 40% a necessidade de água de amassamento na mistura do que com a utilização de plastificantes (aditivos redutores de água de desempenho normal). Além disso, são utilizados com a finalidade de garantir trabalhabilidade no estado fresco e aumento de resistência no estado endurecido, assim como, reduzir a permeabilidade (POLARI, 2007). Em comparação com o aditivo plastificante, maiores quantidades de superplastificante podem ser acrescentadas na mistura, sem que ocorra exsudação excessiva e retardamento da pega, mesmo que a consistência de abatimento seja elevada. Uma ótima dispersão das partículas do cimento na água, acelera a hidratação e, o comum para esse tipo de aditivo seria que ocorresse o endurecimento rápido, porém, por conter lignossulfonatos, que são materiais que tem a função de retardar esse endurecimento, a consistência após adicionar o aditivo pode se manter (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A Figura 2 mostra uma micrografia de

partículas de cimento, quando dispostas na pasta de cimento Portland e água, sem a presença de aditivo e, após ter sido acrescentado o superplastificante na pasta.

Figura 2 - Micrografia de partículas de cimento sem aditivo (a) e com aditivo superplastificante (b)



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

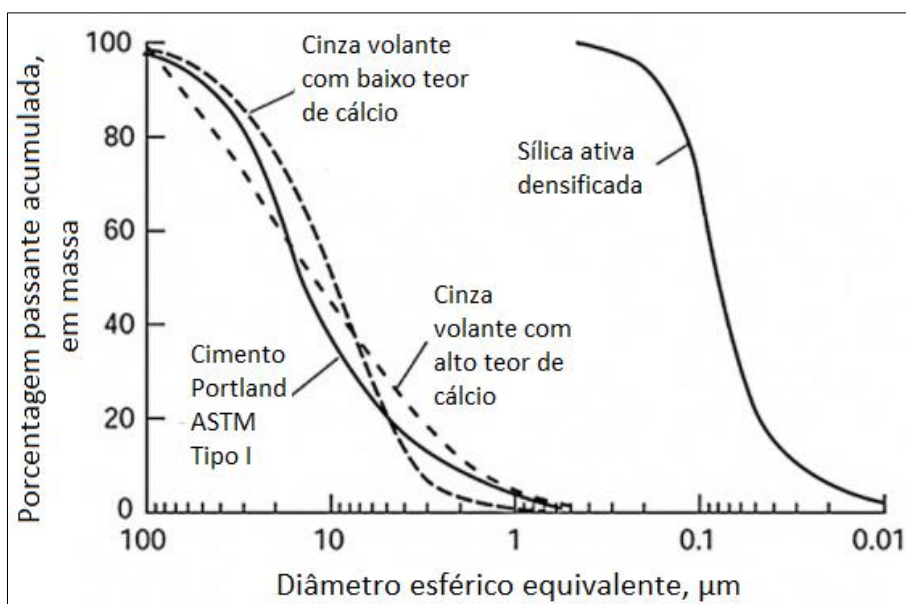
Com a incorporação de um aditivo plastificante, consegue-se obter uma redução da relação água/cimento de 5%, enquanto que, quando da utilização de um aditivo superplastificante, esta relação pode ser reduzida de 20 a 40% (POLARI, 2007). Sabendo que o aumento da resistência é proporcional à redução da relação água/cimento e que a utilização do superplastificante acelera a velocidade de hidratação, as misturas de concreto que utilizam esse aditivo apresentam maior resistência à compressão a um, três e sete dias, ou seja, há uma melhora em idades iniciais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

#### **2.3.4.2 Adições minerais**

Segundo Mehta e Monteiro (2014), em alguns países do mundo os materiais pozolânicos naturais são utilizados, entretanto, por questões ambientais e econômicas, os subprodutos de indústrias têm sido largamente utilizados como componentes do concreto, podendo substituir parcialmente o cimento Portland ou ser acrescentado como adição mineral, o que gera economia de energia e diminuição do custo.

A sílica ativa é um subproduto de processos metalúrgicos da indústria de silício metálico. Os vapores de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) produzidos se oxidam e condensam na zona de baixa temperatura do forno em partículas esféricas muito finas. As partículas são removidas pela filtragem dos gases, sendo sua obtenção considerada mais fácil em comparação com a coleta de cinzas volantes. Se comparadas as partículas da sílica ativa com as de cimento Portland e as de cinza volante (outro material de subproduto, obtido através da combustão de carvão de usinas termoeletricas), que tem em média diâmetro de mesma ordem de grandeza, a sílica ativa difere aproximadamente duas ordens dos mesmos (NAWY, 2001). Essa diferença pode ser observada na Figura 3, onde é feita uma comparação entre a dimensão das partículas dos três materiais.

Figura 3 - Comparação entre diâmetro de partículas de cimento Portland, cinza volante e sílica ativa



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Os principais benefícios da utilização de adições são descritos por Mehta e Monteiro (2014, p. 329):

“[...] melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição na interface, e uma

durabilidade muito maior no que diz respeito ao ataque por sulfatos e à expansão pela reação álcali-agregado”.

## **2.4 Propriedades do concreto**

As principais propriedades que devem ser consideradas para que o concreto chegue nos limites de resistência estipulados, devem ser controladas no estado fresco para que apresentem boas condições também no estado endurecido. A massa específica, trabalhabilidade e teor de ar devem ser consideradas para que no estado endurecido se encontre resistência (AİTCIN, 1998).

### **2.4.1 Propriedades no estado fresco**

É importante controlar as propriedades no estado fresco para que no estado endurecido sejam percebidos os resultados positivos desse controle. Para concretos de alta resistência, qualquer que seja a alteração nos materiais escolhidos podem gerar a perda de abatimento, retardamento da pega ou segregação dos agregados, sendo que, os dois últimos ocorrem principalmente quando há uma alta dosagem de superplastificante. Para os concretos de alta resistência, é importante que exista o controle da massa unitária, teor de ar e abatimento (AİTCIN, 1998).

#### **2.4.1.1 Massa unitária e teor de ar**

A massa unitária do concreto de alta resistência é de 50 a 100 kg/m<sup>3</sup> maior que a do concreto convencional, por conter maior quantidade de cimento e menor quantidade de água. Através da realização de ensaios para sua determinação, tornam-se desnecessárias medições de teor de ar. O concreto de alta resistência geralmente apresenta de 1 a 3% de ar aprisionado, por ser mais viscosa que a mistura de concreto convencional, sendo que, quanto mais baixa for a relação água/aglomerante, maior será a viscosidade. Conforme a redução dessa relação, mais difícil se torna a retirada do ar aprisionado, que dificilmente consegue-se baixar de 1,5 a 2% (AİTCIN, 1998).

#### **2.4.1.2 Trabalhabilidade**

A avaliação da trabalhabilidade consiste em associar a consistência à coesão. A trabalhabilidade será maior quanto mais fluída for a mistura, sem a perda de coesão e segregação dos componentes, ou seja, a trabalhabilidade será maior à medida que a consistência será menor. Essa propriedade não está relacionada diretamente com a plasticidade, pois a trabalhabilidade ideal de uma mistura depende da sua utilização, portanto, para determinado uso, a trabalhabilidade ideal pode ser uma mistura que se apresente seca, enquanto que para outro, pode ser requerida uma alta plasticidade (RECENA, 2015). O método para avaliação desse parâmetro é o abatimento de tronco de cone (*Slump Test*) prescrito na NBR NM 67/1998, da ABNT.

Os fatores que afetam a consistência da mistura estão relacionados com o esqueleto dos agregados e com o comportamento reológico da pasta de cimento. As quantidades, as proporções entre agregados graúdo e miúdo, a granulometria e a forma das partículas influenciam no abatimento. O comportamento reológico da pasta está relacionado a relação água/aglomerante, sendo que, quanto maior for, mais distante estarão as partículas do cimento e a interação entre elas durante a hidratação da pasta não afeta o abatimento. No concreto de alta resistência, considerando que há uma reduzida relação água/aglomerante, as partículas do cimento interagem fisicamente entre si, pois nesse tipo de concreto, a utilização de superplastificantes influencia no abatimento (AITCIN, 1998).

#### **2.4.2 Propriedades no estado endurecido**

De acordo com Helene e Terzian (1992), a resistência à compressão é a propriedade que qualifica o concreto no estado endurecido, por ser adotada para dimensionar as estruturas. Segundo Metha e Monteiro (2014), a resistência de um material pode ser definida como a capacidade de resistir à aplicação de uma força externa, sem que haja o rompimento. O resultado de uma determinada resistência é obtido através das considerações do processo de dosagem, de aspectos de trabalhabilidade e durabilidade, de uma determinada curva granulométrica, do tipo de cimento e da relação água/cimento (HELENE; TERZIAN, 1992).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) um dos principais fatores que influencia na variação da resistência é relação entre a relação água/cimento e a porosidade, pois independentemente de outros fatores, a relação água/cimento afeta a porosidade da pasta de cimento e da zona de transição entre a pasta e o agregado. Segundo Neville e Brooks (2013), os principais fatores que alteram a resistência à compressão são a relação água/cimento, o grau de adensamento, a idade e a temperatura e, afirmam ainda, que são fatores de importância secundária na alteração da resistência, a relação agregado/cimento, a caracterização do agregado e sua dimensão máxima característica e a zona de transição. A utilização de adições minerais que substituem parte do cimento Portland tem crescido gradualmente, pois apesar de causar um retardamento das resistências às primeiras idades, a longo prazo, ocorre um aumento significativo da resistência do concreto, por auxiliar na redução da porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em processos de dosagem de CAR, a partir de melhorias na resistência da zona de transição, pode ser observado o aumento da resistência com uma pequena redução da relação água/cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A resistência à compressão de um concreto de alta resistência aumenta conforme a relação água/aglomerante diminui, porém, quando os agregados graúdos não forem tão resistentes quanto a pasta de cimento hidratada, a resistência não irá aumentar significativamente conforme a diminuição da relação água/aglomerante (AİTCIN, 1998).

A redução da relação água/aglomerante pode se dar por meio da redução do teor de água combinada com a utilização de um aditivo superplastificante ou por meio do aumento do consumo de aglomerante. O processo de endurecimento de um CAR depende da dosagem do superplastificante, utilizado para diminuir a relação água/aglomerante, prevendo manter trabalhabilidade e garantir resistência. Quando os traços forem corretamente dosados em relação ao consumo de cimento e água, pode-se obter resistências em torno de 30 MPa após 24 horas (AİTCIN, 1998).



## 2.5 Métodos de dosagem de concreto de alta resistência

Tutikian e Helene (2011) afirmam que dosagem de concreto é o processo através do qual são escolhidos os materiais dentre os disponíveis para a composição do concreto e determinado o melhor proporcionamento entre cimento, agregados, aditivos e adições, com o objetivo de obter-se uma mistura que atenda a requisitos em seu estado fresco e endurecido e tenha o menor custo possível. Esse proporcionamento dos materiais pode ser obtido a partir de roteiros, chamados de métodos de dosagem. Esses procedimentos podem ser agrupados em métodos experimentais e métodos empíricos, sendo que os métodos experimentais representam uma experiência realizada com materiais definidos e relaciona os resultados aos mesmos, enquanto os métodos empíricos partem de simplificações (RECENA, 2015). O principal objetivo de uma metodologia de dosagem é a compatibilidade entre as características do concreto no estado fresco e as exigidas após o endurecimento, através da elaboração de um concreto que seja o mais econômico possível para uma determinada situação, sendo que este fato é frequentemente desconsiderado por engenheiros, que numerosas vezes empregam concretos com características e custo acima do mínimo exigido (HELENE; TERZIAN, 1992).

Helene e Terzian (1992) apresentaram as principais características para que sejam atingidos os parâmetros da dosagem estipulados, em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e do custo do concreto (QUADRO 1).

Sabe-se que a utilização do concreto de alta resistência apresenta vantagens em relação ao concreto convencional, técnica e economicamente. Os métodos para dosagem de CC são considerados inapropriados para dosar concretos de alta resistência, pois não haveria um correto proporcionamento de materiais, tendo em vista que os métodos para CC não consideram o uso de aditivos, adições e a baixa relação água/cimento que a produção do CAR exige, gerando um excessivo consumo de cimento, o que inviabilizaria a dosagem (CREMONINI et al., 2001).

Quadro 1 - Parâmetros de dosagem em função da trabalhabilidade, resistência e custo

<b>Parâmetro de dosagem do concreto</b>	<b>Concreto fresco para uma boa trabalhabilidade</b>	<b>Concreto endurecido para uma boa resistência</b>	<b>Para redução do custo</b>
Granulometria do agregado miúdo	De preferência fina	De preferência grossa	Grossa
Relação agregado graúdo/miúdo	A diminuir	A aumentar	A maior possível
Consumo de água	A aumentar até um certo ponto	A diminuir	A aumentar
Granulometria total	Preferível contínua	Preferível contínua	A disponível
Dimensão máxima característica do agregado	De preferência média	De preferência pequena	A maior possível
Geometria do grão de agregado graúdo	De preferência esférica (pedregulho)	De preferência irregular (brita)	Esférica (pedregulho)

Fonte: Adaptado pela autora com base em Helene e Terzian (1992).

Os principais parâmetros para dosagem de CAR, consideram principalmente a alta resistência à compressão do concreto, que deve superar os 50 MPa aos 28 dias de idade e a baixa relação água/cimento, em torno de 0,25, podendo ser de até 0,20 em alguns casos. Para que se atinja essa elevada resistência, há necessidade de que o concreto seja compacto e apresente uma menor microfissuração em relação ao concreto convencional (NEVILLE; BROOKS, 2013). As misturas para concretos convencionais e os métodos utilizados para dosagem destes não são eficientes ou aplicáveis para todos os tipos de concretos, porém, ainda que sejam utilizados métodos específicos para dosagem de CAR, os mesmos podem apresentar limitações, por não considerarem as peculiaridades de cada local (CREMONINI et al., 2001). Ainda não há consenso nacional sobre os parâmetros dos procedimentos de dosagem, o que leva diversos pesquisadores a sugerirem seus próprios métodos (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

### **2.5.1 Métodos baseados no volume absoluto**

Aïtcin (1998), afirma que o método do volume absoluto é uma relação de massa e massa específica, mas que considera o material cimentício complementar e aditivos, utilizado para calcular as proporções do traço, em que as massas são transformadas em proporções volumétricas, através da definição da relação água/cimento e quantidade de água, onde o acréscimo pela utilização do superplastificante deve ser considerado.

#### **2.5.1.1 Método Nawy (1996)**

O volume do agregado miúdo é determinado através da subtração dos volumes de todos os materiais do volume total. O método prevê aplicação para concretos com resistência à compressão aos 28 dias, de 48 a 83 MPa. O método considera a dimensão máxima característica do agregado, o valor do abatimento e a resistência à compressão que se deseja alcançar (ALVES, 2000).

Para a aplicação, é necessário definir o tipo e classe do cimento, o módulo de finura, o teor de umidade e a massa unitária e específica dos agregados. A principal vantagem é que o traço é facilmente obtido. A principal desvantagem é o alto consumo de cimento, que pode gerar problemas por conta do calor de hidratação (ALVES, 2000).

#### **2.5.1.2 Método Aïtcin (1998)**

O método consiste na combinação de resultados empíricos e cálculos baseados no método do volume absoluto, para aplicação em concretos de 40 a 160 MPa. O procedimento de dosagem considera características do traço e proporções de materiais, sendo estas, a relação água/cimento, o teor de água, a dosagem de superplastificante, o teor de agregado graúdo e o teor de ar incorporado (AÏTCIN, 1998). Segundo Alves (2000), o método considera o valor do abatimento, a dimensão máxima característica do agregado e a resistência que se deseja alcançar.

Para a aplicação, é necessário definir o ponto de saturação, a massa específica e a quantidade de sólidos do aditivo, forma do agregado graúdo e teor de ar incorporado, além de obter os resultados de ensaios de massa específica e absorção de água dos agregados. As vantagens do método é que ele permite que seja considerado as características dos materiais e a utilização de uma tabela que, conforme é preenchida, se torna um roteiro para os cálculos. A desvantagem é que quando há alteração das características dos materiais, devem ser realizados ajustes (ALVES, 2000).

#### **2.5.1.3 Método IPT/EPUSP Modificado (2001)**

A partir do método IPT/EPUSP, de Helene e Terzian (1992), utilizado para dosagem de concretos convencionais, Cremonini et al. (2001) desenvolveram o método adaptado para CAR para que se pudesse obter menores consumos de cimento. O procedimento de dosagem não considera parâmetros relacionados às características dos materiais, mas considera o teor de argamassa, obtido de maneira experimental. O método considera a relação água/materiais secos totais (H), o traço 1:m, sendo material aglomerante: agregados totais (CREMONINI, et al., 2001).

Para aplicação, deve-se determinar a relação água/aglomerante, o abatimento e a massa específica do concreto. Uma das principais vantagens do método é que requer poucos ensaios de caracterização e, pela definição do teor ideal de argamassa se dar de maneira experimental, de acordo com o proposto por Helene e Terzian (1992), o concreto dificilmente apresentará falta ou excesso de argamassa (CREMONINI, et al., 2001).

#### **2.5.2 Métodos baseados na otimização do esqueleto granular**

Os métodos que utilizam como base a otimização de um esqueleto granular buscam uma redução do índice de vazios, ao menor índice possível. Os métodos consideram uma relação ideal entre os agregados graúdos e miúdos, que pode ser obtida através de ensaio de compactação, para encontrar o esqueleto granular ótimo (ALVES, 2000).

### **2.5.2.1 Método Mehta-Aïtcin (1990b)**

O método consiste de um procedimento simplificado de dosagem para aplicação em concretos de 60 a 120 MPa. O procedimento de dosagem considera a dimensão máxima característica do agregado e o valor de abatimento (AÏTCIN, 1998).

Para a aplicação, é necessário definir a massa específica do cimento, da adição e dos agregados. A vantagem desse método é que requer apenas os ensaios de massa específica, pois, supondo que 65% do concreto é composto pelo esqueleto granular, presume-se que exista o menor teor de vazios, sendo desnecessários ensaios de massa unitária e índice de vazios. A desvantagem está justamente relacionada ao fato deste método presumir várias considerações iniciais e não considerar outras características dos materiais (ALVES, 2000).

### **2.5.2.2 Método de Larrard (1990)**

O método consiste em encontrar a máxima compacidade possível da mistura prevendo a diminuição do risco de segregação e buscando otimizar a mistura dos agregados através de uma granulometria descontínua (TUTIKIAN; HELENE, 2011). O método é baseado em duas ferramentas semi-empíricas de dosagem, onde a trabalhabilidade está relacionada com a fluidez da mistura através do modelo de Farris; e a resistência do concreto é prevista através de uma adaptação da fórmula de Feret (AÏTCIN, 1998). O método considera a dimensão máxima característica do agregado, o valor do abatimento e a resistência à compressão que se deseja alcançar (ALVES, 2000).

Para a aplicação, é necessário que se obtenha a granulometria dos agregados, execute-se traços de um concreto convencional para que se possa estimar o consumo de água e a fixação do limite superior da relação água/aglomerante. As vantagens estão relacionadas com a utilização do índice de saturação do superplastificante e a quantidade moderada de pasta, apresentando boas propriedades no estado fresco e evitando problemas causados pelo calor de hidratação, respectivamente. As principais desvantagens são em relação aos vários ensaios preliminares e à grande quantidade requerida de superplastificante (ALVES, 2000).

### **2.5.2.3 Método Toralles-Carbonari (1996)**

O método consiste na estruturação do processo de dosagem em três etapas. A primeira é a elaboração da pasta, a segunda do esqueleto granular e a terceira, a combinação das outras duas. O método busca a melhor composição de proporções e materiais das duas primeiras etapas separadamente e o consumo ótimo de pasta para o esqueleto (TORALLES-CARBONARI apud TORALLES-CARBONARI et al., 2003). O método considera o valor do abatimento, o tipo e dosagem da adição e a resistência que se deseja alcançar (ALVES, 2000).

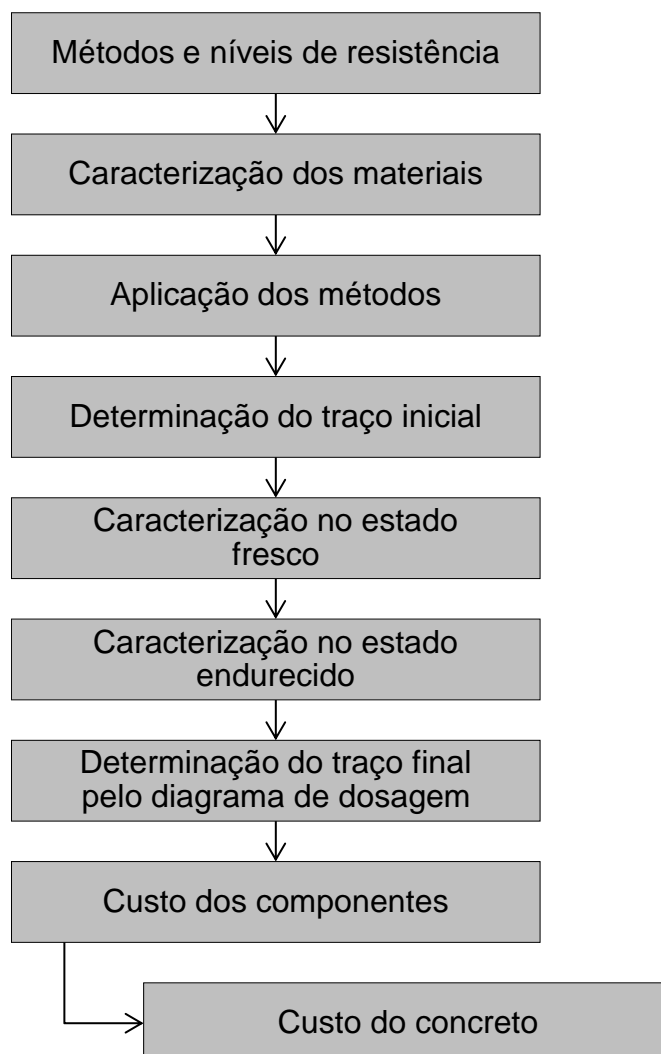
Para a aplicação, é necessário definir o valor do abatimento, o ponto de saturação do aditivo, a absorção dos agregados, obter os resultados de ensaios da massa específica dos agregados e da mistura, realizar a otimização do esqueleto granular e a análise granulométrica. A principal vantagem desse método está relacionada com testes para encontrar as melhores combinações entre os materiais. A desvantagem está relacionada à grande quantidade de ensaios preliminares e à elaboração de diversas misturas para encontrar a melhor compatibilidade entre os materiais (ALVES, 2000).

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em dosar concretos de alta resistência através de métodos específicos propostos por três grupos de pesquisadores e avaliar o custo do metro cúbico para as classes de resistência determinadas.

Para tais procedimentos, selecionou-se três métodos de dosagem, sendo estes Aïtcin (1998), Mehta-Aïtcin (1990b) e IPT/EPUSP Modificado (2001); e três níveis de resistência à compressão esperada aos 28 dias, de 60, 80 e 100 MPa. Determinou-se em laboratório, a caracterização dos materiais que os métodos definidos exigem, tais como, a massa unitária e a massa específica dos componentes. Com os resultados da caracterização dos materiais e considerando o que preconiza cada método, pôde-se determinar o traço unitário inicial e obter o consumo de material aglomerante e dos demais materiais para cada nível de resistência. Com os traços definidos, realizou-se as dosagens e a caracterização da mistura no estado fresco quanto à consistência, assim como, a caracterização da mistura no estado endurecido quanto à resistência mecânica à compressão. Com base nos resultados obtidos, desenvolveu-se o diagrama de dosagem, onde definiu-se o consumo de aglomerantes, agregados e a relação água/aglomerante, com o intuito de se obter o traço final para a resistência à compressão esperada aos 28 dias. Através disso, e da composição de custo dos materiais, pôde-se definir o custo por metro cúbico de concreto para as classes de resistência estipuladas. A Figura 4 apresenta o fluxograma do desenvolvimento das etapas dos estudos e atividades descritas.

Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento das etapas do trabalho



Fonte: Da autora (2017).

### 3.1 Materiais

As características dos materiais têm notável influência no processo de dosagem, desta forma, os componentes da mistura devem ser escolhidos para que se obtenha as propriedades requeridas, sendo estas, trabalhabilidade e resistência mecânica. Realizou-se a caracterização dos materiais, conforme os parâmetros exigidos para aplicação dos métodos.



### **3.1.1 Cimento Portland**

Para todas as misturas foram utilizados o mesmo tipo de cimento, marca e lote, para que não houvesse influência nos resultados. De acordo com a necessidade de dosagem de concretos de alta resistência, o aglomerante escolhido deve ser o mais puro possível, sendo selecionado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI). De acordo com a NBR 5733/1991, da ABNT, não são permitidas quaisquer adições além de, no máximo, 5% de fíler calcário; e o material deve apresentar resistência à compressão de, pelo menos, 34 MPa aos 28 dias.

A escolha do tipo de cimento baseou-se ainda, na pesquisa realizada por Castro, Liborio e Pandolfelli (2011), em que concluíram que o CP V-ARI é mais eficiente, referente à resistência à compressão, do que o cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno (CP II E 32), para a produção de misturas de concreto de alto desempenho, até os 28 dias, por apresentar maior teor de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e por conta das partículas serem menores.

Determinou-se a massa específica do cimento Portland através da NBR 16605/2017, da ABNT, sendo  $2,97 \text{ g/cm}^3$ .

### **3.1.2 Agregados**

Para todas as misturas foram utilizados os mesmos agregados, obtidos em único lote, do mesmo local, para que não houvesse influência nos resultados.

#### **3.1.2.1 Agregado graúdo**

As principais características a serem consideradas no agregado graúdo são forma e dimensão, sendo que, devem ser o mais cúbico possível, de maneira a reduzir o atrito e a área superficial, assim como, deve ter a menor dimensão possível. Sendo assim, foram selecionadas pedras de granito britadas nº 1 e nº 0, de formato cúbico.

Através de diferentes composições de brita nº 1 e 0, determinou-se a massa unitária dessas misturas das britas, de acordo com a NBR NM 45/2006, da ABNT, a fim de verificar a composição que apresentasse o maior valor de massa unitária, que representa a melhor definição do esqueleto granular e, conseqüentemente, o menor

índice de vazios. A Tabela 1, apresenta a composição das misturas das britas, através da denominação de faixas.

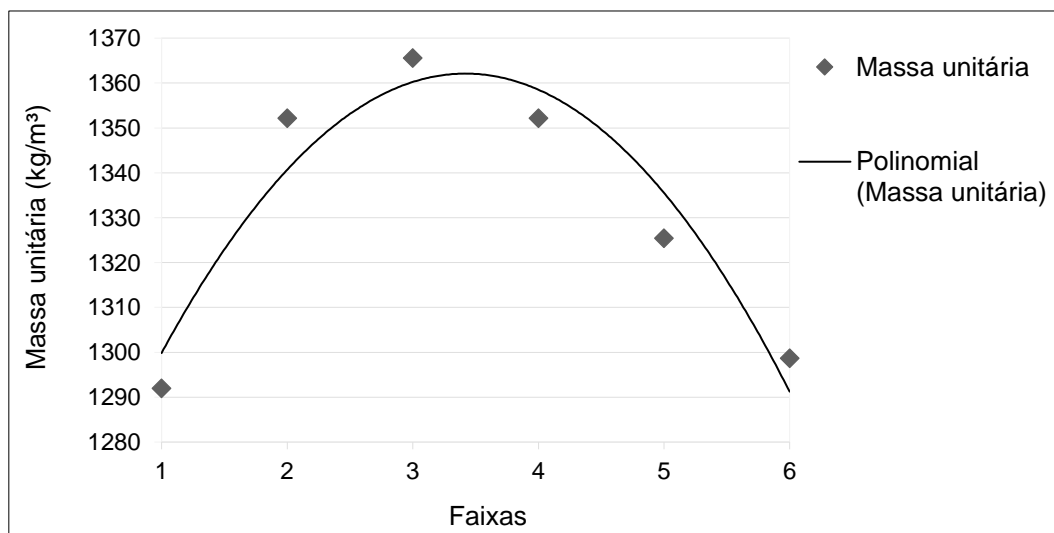
Tabela 1 - Composição das misturas das britas

	Brita 0	Brita 1
<b>Faixa 1</b>	0%	100%
<b>Faixa 2</b>	20%	80%
<b>Faixa 3</b>	40%	60%
<b>Faixa 4</b>	60%	40%
<b>Faixa 5</b>	80%	20%
<b>Faixa 6</b>	100%	0%

Fonte: Da autora (2017).

Conforme o Gráfico 1, que apresenta a curva das massas unitárias da composição das misturas das britas, o maior valor de massa unitária é o da Faixa 3, que representa 60% de brita nº 1 e 40% de brita nº 0, sendo determinado o valor de massa unitária como 1365,6 kg/m<sup>3</sup>. A partir desse parâmetro e da absorção (obtida através da NBR NM 53/2002, da ABNT), pôde-se obter o valor da massa unitária do agregado graúdo na condição saturado superfície seca (SSS), sendo 1520,20 kg/m<sup>3</sup>.

Gráfico 1 - Curva das massas unitárias das misturas de brita



Fonte: Da autora (2017).

A distribuição granulométrica, a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF) foram determinados através dos métodos de ensaio e cálculos descritos na NBR NM 248/2001, da ABNT. A Tabela 2 apresenta a massa média retida em cada peneira, a porcentagem média retida em cada peneira e a porcentagem média retida acumulada em cada peneira. Logo, pôde-se definir a DMC do agregado graúdo sendo 19 mm e o MF sendo 6,43.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Massa média retida (g)</b>	<b>% média retida</b>	<b>% média acumulada</b>
19,0	0,0	0	0
12,5	1888,2	23	23
9,5	2427,5	30	52
6,3	2174,9	26	78
4,75	1104,7	13	91
fundo	716,0	9	100

Fonte: Da autora (2017).

Determinou-se a massa específica do agregado seco, na condição saturado superfície seca (SSS), aparente e a absorção, através das prescrições da NBR NM 53/2002, da ABNT. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Massas específicas e absorção do agregado graúdo

<b>Massa específica do agregado seco (g/cm³)</b>	<b>Massa específica na condição agregado SSS (g/cm³)</b>	<b>Massa específica aparente (g/cm³)</b>	<b>Absorção (g/cm³)</b>	<b>Absorção (%)</b>
2,91	2,57	2,40	1,37	1,37

Fonte: Da autora (2017).

### 3.1.2.2 Agregado miúdo

As principais características a serem consideradas no agregado miúdo são dimensão e finura, devendo ser a mais grossa possível, dentro da curva granulométrica ideal, sendo selecionada a areia natural média.

Determinou-se a massa unitária do agregado miúdo conforme a NBR NM 45/2006, da ABNT, sendo  $1564 \text{ kg/m}^3$ . A partir desse parâmetro e da absorção (obtida através da NBR NM 52/2009, da ABNT), pôde-se obter o valor da massa unitária do agregado graúdo na condição saturado superfície seca (SSS), sendo  $1578,10 \text{ kg/m}^3$ .

A distribuição granulométrica, a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF) foram determinados através dos métodos de ensaio e cálculos descritos na NBR NM 248/2001, da ABNT. A Tabela 4 apresenta a massa média retida em cada peneira, a porcentagem média retida em cada peneira e a porcentagem média retida acumulada em cada peneira. Sendo assim, pôde-se definir a DMC do agregado miúdo sendo 4,75 mm e o MF sendo 2,34.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo

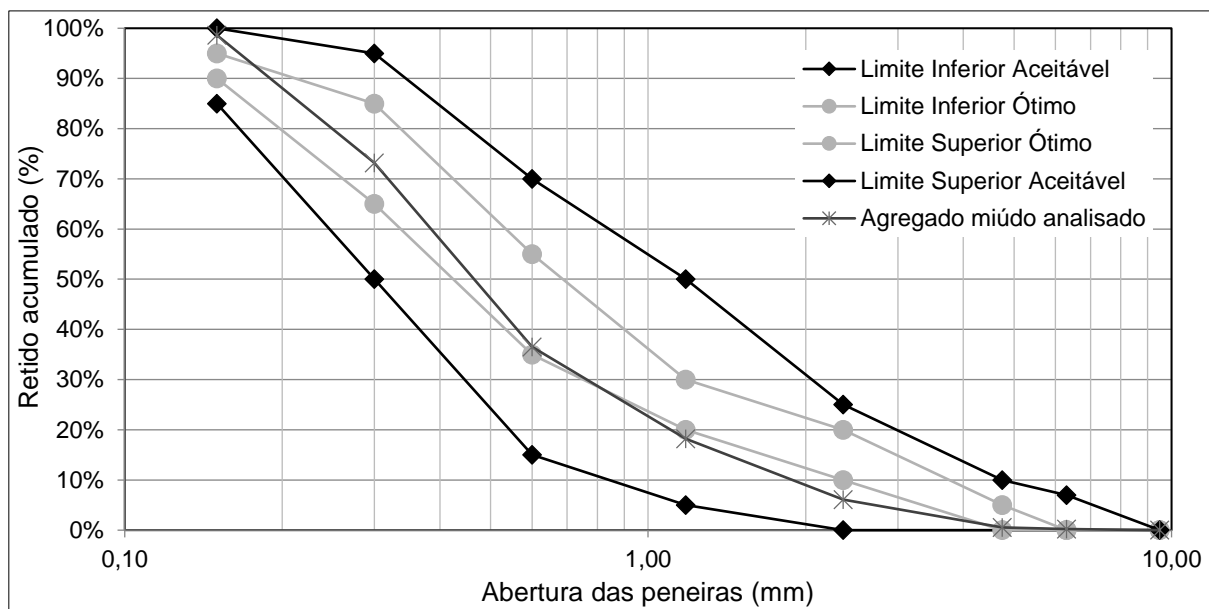
Abertura da peneira (mm)	Massa média retida (g)	% média retida	% média acumulada
6,3	4,05	0	0
4,75	6,65	0	1
2,36	110,55	6	6
1,18	241,6	12	18
0,6	366,1	18	37
0,3	731,55	37	73
0,15	507,7	25	99
fundo	28,95	1	100

Fonte: Da autora (2017).

O Gráfico 2 apresenta os limites aceitável e ótimo de distribuição granulométrica para o agregado miúdo, de acordo com a NBR 7211/2009, da ABNT.

A partir da análise do gráfico, pôde-se observar que a curva granulométrica do agregado miúdo ensaiado se encontra dentro do limite aceitável e, em parte, dentro do limite ótimo. Com base nessa análise e no valor do módulo de finura, pôde-se constatar que o agregado miúdo analisado está dentro do limite ótimo.

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Da autora (2017).

Determinou-se a massa específica do agregado seco, na condição saturado superfície seca (SSS), aparente e a absorção, através das prescrições da NBR NM 52/2009, da ABNT. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Massas específicas e absorção do agregado miúdo

Massa específica do agregado seco (g/cm³)	Massa específica na condição agregado SSS (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)	Absorção (g/cm³)	Absorção (%)
2,93	2,88	2,85	0,91	0,91

Fonte: Da autora (2017).

### 3.1.3 Adição mineral

De acordo com as especificações dos métodos de dosagem, como adição mineral utilizou-se a sílica ativa. O produto utilizado foi o Silmix, composto por sílica amorfa; óxido de ferro, cálcio, alumínio, magnésio, sódio e potássio; carbono e umidade. Determinou-se a massa específica da sílica ativa através da NBR 16605/2017, da ABNT, sendo 1,94 g/cm<sup>3</sup>.

De acordo com Nawy (2001), a dosagem de sílica ativa pode variar de 5 a 30% da quantidade de material aglomerante, dependendo da resistência e trabalhabilidade requeridas. Cremonini et al. (2001), fixaram a quantidade de sílica ativa em 10% do volume total de material aglomerante.

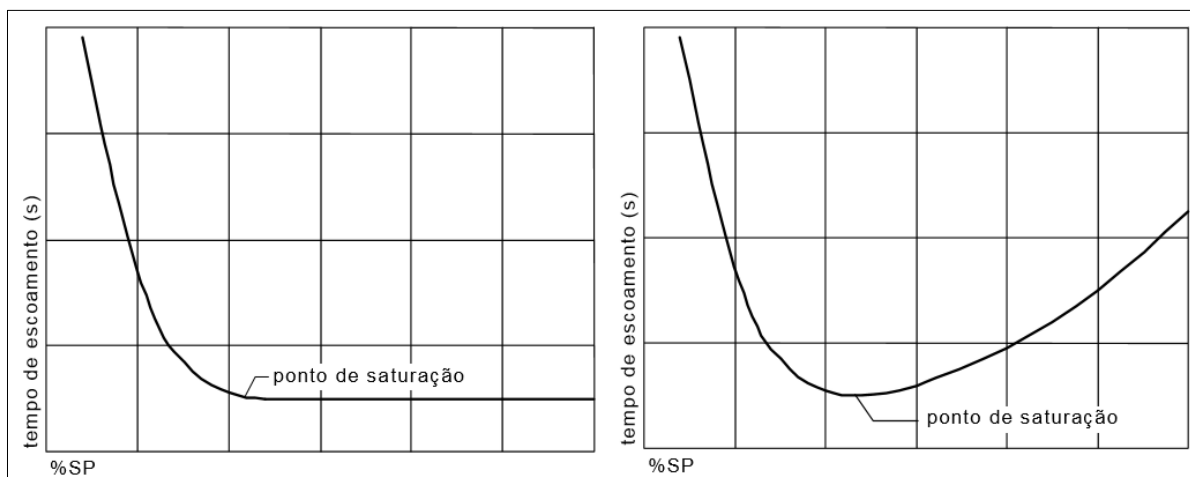
Definiu-se a porcentagem de sílica ativa em relação a quantidade total de material aglomerante, sendo fixada para todos os métodos, para que pudesse haver uma comparação efetiva entre os mesmos. Considerou-se o volume total de material aglomerante sendo composto por 90% de cimento Portland e 10% de sílica ativa. Obteve-se o total de material aglomerante, em massa, através da definição da composição em volume e das massas específicas dos respectivos materiais, sendo 93% composto por cimento Portland e 7% por sílica ativa.

### 3.1.4 Aditivo químico

O aditivo utilizado em misturas de concreto de alta resistência é o superplastificante. O produto utilizado foi o Glenium 51, um aditivo superplastificante de terceira geração, com base química de éter policarboxílico, utilizado na forma de líquido. Definiu-se o ponto de saturação do aditivo e a compatibilidade entre o cimento e o aditivo superplastificante através do ensaio indicado na NBR 7681-2/2013, da ABNT.

A Figura 5 apresenta gráficos que relacionam o teor de aditivo com o tempo de escoamento, demonstrando as relações típicas, constatadas através da aplicação do ensaio com o cone de Marsh, em casos onde há compatibilidade entre o cimento e o aditivo. A partir da apresentação da curva, pode-se definir o ponto de saturação limite da utilização do superplastificante (AZEVEDO, 2002).

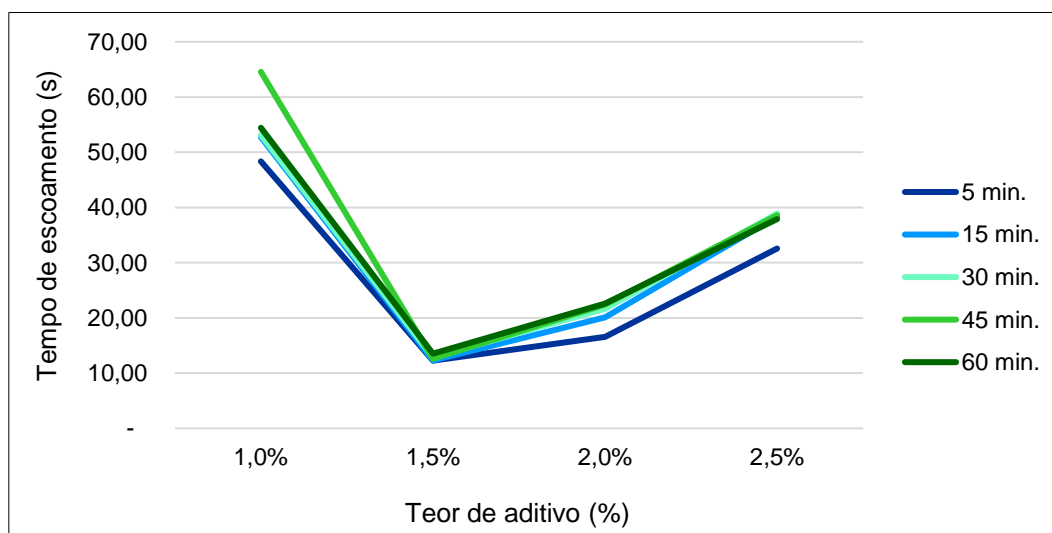
Figura 5 - Ponto de saturação do aditivo



Fonte: Azevedo (2002).

Foram elaboradas cinco misturas, nas quais as quantidades de cimento e água foram fixadas, variando somente o teor de aditivo. As misturas foram ensaiadas aos 5, 15, 30, 45 e 60 minutos, com teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% de aditivo sobre a massa de cimento. Pôde-se definir o ponto de saturação do superplastificante em 1,5%, o que representa o limite da utilização (GRÁFICO 3). Observou-se que, para dosagens que ultrapassam esse valor, o aditivo não apresenta mais o mesmo efeito e o tempo de escoamento tende a aumentar, constatando-se que dosagens a partir desse limite não apresentam vantagens técnicas e econômicas.

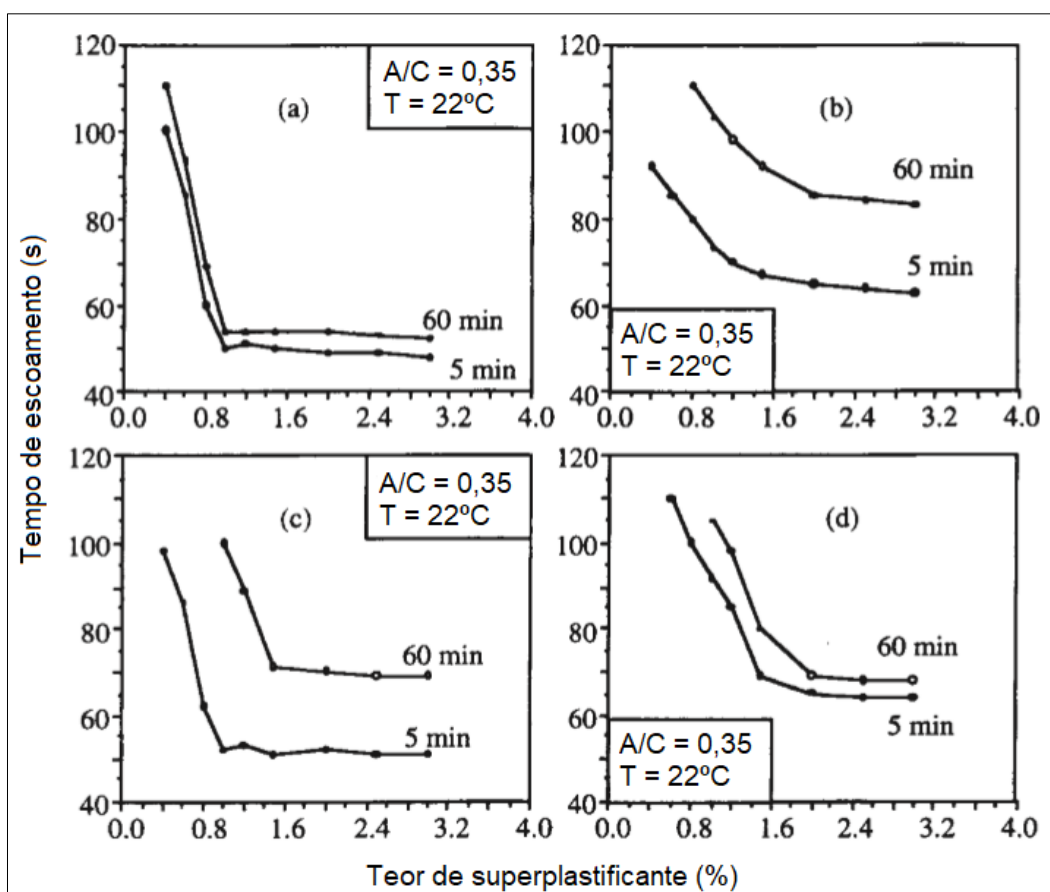
Gráfico 3 - Ponto de saturação do aditivo



Fonte: Da autora (2017).

A Figura 6, apresenta casos de compatibilidade e incompatibilidade entre cimento e superplastificante. Tendo em vista que este fator é observado pela perda da fluidez da mistura durante o tempo, a Figura 6 (a) apresenta compatibilidade, pois as curvas de 5 minutos e 60 minutos estão próximas e pode-se definir facilmente um ponto de saturação. A figura 6 (b) não se consegue definir um ponto de saturação e as curvas estão afastadas, o que demonstra que houve uma diminuição da fluidez com o tempo. As Figuras 6 (c) e 6 (d) apresentam curvas intermediárias, que se assemelham às das Figuras anteriores, sendo que, a Figura 6 (c) apresenta a curva de 5 minutos parecida com a Figura 6 (a) e a de 60 minutos parecida com a Figura 6 (b), enquanto a Figura 6 (d) apresenta o contrário (AZEVEDO, 2002).

Figura 6 - Curvas de compatibilidade e incompatibilidade cimento-superplastificante



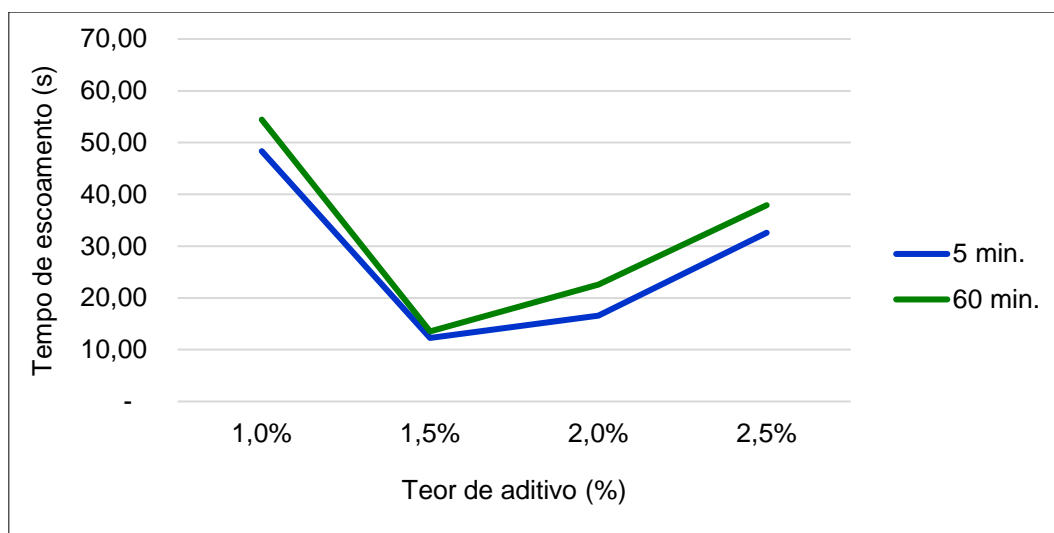
Fonte: Aïtcin (1998).

As curvas obtidas no Gráfico 3, para 5 e 60 minutos, são apresentadas no Gráfico 4, no qual, demonstram que, além de definir-se o ponto de saturação do



aditivo, pôde-se verificar a compatibilidade cimento-superplastificante, através dos resultados do tempo de escoamento e pela semelhança com as proposições apresentadas na Figura 6 (a). A compatibilidade se comprova através da verificação de que, mesmo após o período de 55 minutos, a mistura continua escoando dentro de um intervalo de tempo muito próximo.

Gráfico 4 - Compatibilidade cimento-superplastificante



Fonte: Da autora (2017).

De acordo com o fabricante do aditivo, tanto a massa específica quanto o teor de sólidos, encontram-se dentro de limites. Para o desenvolvimento deste trabalho, foram considerados valores referentes à média aritmética de cada parâmetro. Os dados apresentados pelo fabricante e os dados definidos, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica e teor de sólidos do aditivo

	Massa específica (g/cm³)	Teor de sólidos (%)
<b>Fabricante</b>	1,067 – 1,107	28,5 – 31,5
<b>Considerado</b>	1,087	30

Fonte: Da autora (2017).

### 3.2 Métodos

Este trabalho tem como objetivo comparar os resultados do custo por metro cúbico de concretos dosados através de métodos específicos para CAR, para diferentes classes de resistência à compressão.

Para iniciar o procedimento, foram selecionados três métodos, sendo estes, método Aïtcin (1998), Mehta-Aïtcin (1990b) e IPT/EPUSP Modificado (2001). Selecionou-se os métodos com base nas escolhas realizadas por Alves (2000) e de acordo com as proposições de Cremonini et al. (2001). Selecionou-se o método proposto por Mehta e Aïtcin (1990b) por ser de fácil desenvolvimento e execução, além de ser prático para aplicação nas obras; e, o método proposto por Aïtcin (1998) por ser facilmente executado, além de considerar características referente aos materiais (ALVES, 2000). O método IPT/EPUSP Modificado, de Cremonini et al. (2001), foi selecionado por ter o objetivo de desenvolver um método experimental específico para CAR, baseado no método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1996) para concretos convencionais, que obtivesse um baixo consumo de cimento (CREMONINI, et al., 2001).

Para os métodos Aïtcin (1998) e Mehta-Aïtcin (1990b), definiu-se os valores de resistência à compressão requerida variando em intervalos iguais de 20 MPa, sendo 60, 80 e 100 MPa. Selecionou-se os níveis de resistência com base nas escolhas realizadas por Alves (2000), em que definiu cinco níveis de resistência, variando em intervalos de 15 MPa, que iniciavam em 50 MPa; e, Cremonini et al. (2001), em que definiram três níveis, variando intervalos desiguais, de 50, 80 e 100 MPa.

Para o método IPT/EPUSP Modificado (2001), definiu-se o traço inicial 1:m (material aglomerante: agregados totais, em massa) sendo 1:5 e os traços auxiliares sendo 1:4 e 1:3. De acordo com Alves (2000), a utilização de valores de “m” maiores que 5, resulta em uma relação água/aglomerante alta, que pode resultar em um desempenho insatisfatório para a tentativa de produzir CAR.

### 3.2.2 Aplicação dos métodos e determinação do traço inicial

Os métodos diferem em sua aplicação, pois cada um considera diferentes parâmetros e os relaciona de forma distinta. O método Aïtcin prevê ensaios e observações acerca das características dos materiais; enquanto o método Mehta-Aïtcin parte de dados e relações tabelados, independente do conhecimento das características dos materiais; e o método IPT/EPUSP Modificado parte de equações que relacionam os parâmetros iniciais e depende de uma dosagem experimental.

Como os métodos Aïtcin e Mehta-Aïtcin são calculados a partir da escolha do nível de resistência que se deseja alcançar e o método IPT/EPUSP Modificado baseia-se no traço de material aglomerante: agregados totais (1:m), identificou-se as misturas em “Nível A”, “Nível B” e “Nível C” (TABELA 7).

Tabela 7 - Identificação dos concretos

Identificação	Método	Níveis de resistência Traço 1:m
Nível A	Aïtcin	60 MPa
	Mehta-Aïtcin	60 MPa
	IPT/EPUSP Modificado	Traço 1:5
Nível B	Aïtcin	80 MPa
	Mehta-Aïtcin	80 MPa
	IPT/EPUSP Modificado	Traço 1:4
Nível C	Aïtcin	100 MPa
	Mehta-Aïtcin	100 MPa
	IPT/EPUSP Modificado	Traço 1:3

Fonte: Da autora (2017).

Determinou-se o consumo de material através da aplicação de cada método e, conforme segue, são apresentados as recomendações e os resultados obtidos com a dosagem, bem como, o traço final para cada nível de resistência alcançada.

### 3.2.2.1 Método Aïtcin (1998)

Definiu-se os níveis de resistência e obteve-se a relação água/aglomerante através de um gráfico que relaciona estes parâmetros. O consumo de água é obtido por meio de um ábaco que o relaciona com o ponto de saturação do aditivo. Para os cálculos, se considerou as massas específicas dos materiais aglomerantes e dos agregados na condição SSS. Ainda, se assumiu que a mistura apresentava 1,5% de ar incorporado, sobre o volume total de concreto.

O total de material aglomerante, em massa, é obtido através do consumo de água e da relação água/aglomerante, sendo que 93% é composto por cimento Portland e 7% por sílica ativa. O teor de agregado graúdo é definido de acordo com o formato dos grãos. Obteve-se o teor de agregado miúdo considerando 1m<sup>3</sup> de concreto, subtraindo os valores de volume dos demais componentes, sendo que, definiu-se os volumes de brita, cimento e sílica ativa, por meio da relação entre massa e massa específica; volume de ar incorporado, definido anteriormente; e, volume de sólidos do superplastificante. A massa da fração de sólidos do aditivo é obtida através da multiplicação do ponto de saturação do aditivo e do total de material aglomerante, em massa. A massa específica dos sólidos leva em consideração o teor de sólidos e a massa específica do aditivo. Para encontrar o volume de sólidos, considera-se a massa, massa específica e teor da fração de sólidos.

Através disso, pôde-se obter as quantidades dos materiais componentes, em massa, para execução de 1m<sup>3</sup> de concreto (TABELA 8).

Tabela 8 - Planilha de dosagem para 1m<sup>3</sup> de concreto – Método Aïtcin

Resist.	Material agl. (kg)		Água (kg)	Agregados (kg)		Total (kg)	Relação a/agl.
	Cimento Portland	Sílica ativa		Graúdo	Miúdo		
Nível A	438	33	165	1100	652	2388	0,35
Nível B	512	39	165	1100	572	2387	0,30
Nível C	548	41	165	1100	532	2386	0,28

Fonte: Da autora (2017).

Pôde-se obter o desdobramento do traço 1: a: p: a/agl. para qualquer quantidade de concreto que se deseje dosar, sendo material aglomerante: agregado miúdo: agregado graúdo: relação água/aglomerante (TABELA 9).

Tabela 9 - Traço unitário (1: a: p: a/agl.) – Método Aïtcin

<b>Resistência</b>	<b>Traço unitário</b>
Nível A	1: 1,38: 2,33: 0,35
Nível B	1: 1,04: 2,00: 0,30
Nível C	1: 0,90: 1,87: 0,28

Fonte: Da autora (2017).

Pelos ensaios e cálculos para obtenção de parâmetros se basearem em agregados na condição SSS, para a aplicação do método, utilizou-se os mesmos nessa condição. Para isso, houve a necessidade de correção da quantidade de água, descontando o teor de umidade presente nos agregados, bem como, a água presente no aditivo. As quantidades de material utilizado para a produção são apresentadas na Tabela 10. O parâmetro “H” representa a relação entre a quantidade de água e a de materiais secos totais.

Tabela 10 - Quantidade de material para execução do concreto – Método Aïtcin

	<b>Nível A</b>	<b>Nível B</b>	<b>Nível C</b>
<b>Traço (1:m)</b>	1: 3,7	1: 3,0	1: 2,8
<b>Cimento (kg)</b>	7,72	9,00	9,64
<b>Areia (kg)</b>	11,58	10,16	9,45
<b>Brita (kg)</b>	19,63	19,63	19,62
<b>Água (l)</b>	2,45	2,45	2,45
<b>Sílica ativa (kg)</b>	0,58	0,68	0,73
<b>a/agl.</b>	0,35	0,30	0,28
<b>Aditivo (g)</b>	15,62	37,50	45,00
<b>Aditivo (%)</b>	0,20	0,42	0,47
<b>Abatimento (mm)</b>	95	85	85

	Nível A	Nível B	Nível C
<b>Consumo de aglomerante (kg/m³)</b>	471,43	550,00	589,29
<b>H (%)</b>	7,42	7,43	7,43

Fonte: Da autora (2017).

### 3.2.2.2 Método Mehta-Aïtcin (1990b)

Definiu-se os níveis de resistência e, o consumo de água, que é obtido através de uma tabela que relaciona estes parâmetros. Este método considera que a pasta representa 0,35m³ de 1m³ de concreto, enquanto o esqueleto granular representa os demais 0,65m³. Para os cálculos, se considerou as massas específicas dos materiais aglomerantes e dos agregados na condição SSS. Ainda, foi considerado que a mistura apresenta 2,0% do volume total do concreto, de ar incorporado.

A quantidade de cimento e sílica, em massa, pode ser definida através da relação entre volume de aglomerante e massa específica do cimento e da sílica ativa, pois sabe-se que o total de material aglomerante, em massa, é composto por 93% de cimento Portland e 7% de sílica ativa. O volume de cada material, é determinado através da relação entre massa e massa específica de cada um. Os volumes dos materiais da fração da pasta são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Distribuição do volume de pasta (m³)

Resistência	Água (m³)	Ar (m³)	Material agl. total (m³)	Cimento Portland (m³)	Sílica ativa (m³)
Nível A	0,180	0,02	0,150	0,1345	0,0155
Nível B	0,155	0,02	0,175	0,1569	0,0181
Nível C	0,140	0,02	0,190	0,1704	0,0196

Fonte: Da autora (2017).

Os teores de agregado graúdo e miúdo são definidos de acordo com o nível de resistência, sendo que deve-se iniciar o nível A com a proporção entre agregado miúdo e graúdo de 2:3. Essa proporção é fixada, mas deve ser alterada conforme a

resistência requerida aumenta, devendo diminuir a quantidade de agregado miúdo enquanto aumenta a quantidade de agregado graúdo. A relação utilizada, em volume, é apresentada na Tabela 12. As quantidades destes materiais, em massa, são obtidas através da relação entre este parâmetro e a massa específica.

Tabela 12 - Relação agregado graúdo : miúdo

<b>Resistência</b>	<b>Relação volumétrica dos agregados miúdos : graúdos</b>
Nível A	2,00 : 3,00
Nível B	1,95 : 3,05
Nível C	1,90 : 3,10

Fonte: Da autora (2017).

Através disso, pôde-se obter as quantidades dos materiais componentes, em massa, para execução de 1m<sup>3</sup> de concreto (TABELA 13).

Tabela 13 - Planilha de dosagem para 1m<sup>3</sup> de concreto – Método Mehta-Aïtcin

<b>Resist.</b>	<b>Material agl. (kg)</b>		<b>Água (kg)</b>	<b>Agregados (kg)</b>		<b>Total (kg)</b>	<b>Relação a/agl.</b>
	<b>Cimento Portland</b>	<b>Sílica ativa</b>		<b>Graúdo</b>	<b>Miúdo</b>		
Nível A	400	30	180	1004	748	2362	0,42
Nível B	466	35	155	1021	730	2406	0,31
Nível C	506	38	140	1037	711	2432	0,26

Fonte: Da autora (2017).

Pôde-se obter o desdobramento do traço 1: a: p: a/agl. para qualquer quantidade de concreto que se deseje dosar, sendo material aglomerante: agregado miúdo: agregado graúdo: relação água/aglomerante (TABELA 14).

Tabela 14 - Traço unitário (1: a: p: a/agl.) – Método Mehta-Aïtcin

<b>Resistência</b>	<b>Traço unitário</b>
Nível A	1: 1,74: 2,34: 0,42
Nível B	1: 1,46: 2,04: 0,31
Nível C	1: 1,31: 1,91: 0,26

Fonte: Da autora (2017).

Para os cálculos, considerou-se a massa específica do agregado SSS e para a dosagem, utilizou-se os mesmos nessa condição. Para isso, houve a necessidade de correção da quantidade de água, descontando o teor de umidade presente nos agregados, bem como, a água presente no aditivo. As quantidades de material utilizado para a produção são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Quantidade de material para execução do concreto – Método Mehta-Aïtcin

	<b>Nível A</b>	<b>Nível B</b>	<b>Nível C</b>
<b>Traço (1:m)</b>	1: 4,1	1: 3,5	1: 3,2
<b>Cimento (kg)</b>	7,03	8,20	8,41
<b>Areia (kg)</b>	13,29	12,96	11,92
<b>Brita (kg)</b>	17,91	18,21	17,47
<b>Água (l)</b>	2,73	2,28	1,89
<b>Sílica ativa (kg)</b>	0,53	0,62	0,63
<b>a/agl.</b>	0,42	0,31	0,26
<b>Aditivo (g)</b>	21,94	33,28	76,65
<b>Aditivo (%)</b>	0,31	0,41	0,91
<b>Abatimento (mm)</b>	95	90	100
<b>Consumo de aglomerante (kg/m³)</b>	429,61	501,21	544,17
<b>H (%)</b>	8,25	6,88	6,11

Fonte: Da autora (2017).



### 3.2.2.3 Método IPT/EPUSP Modificado (2001)

Definiu-se a relação água/materiais secos totais (H) em 6% e, a partir deste parâmetro e da definição das massas totais de agregados (m), pode-se obter as relações água/aglomerante.

Determinou-se experimentalmente o teor de argamassa, conforme o método IPT/EPUSP para concretos convencionais, de Helene e Terzian (1996), através de um traço 1:5. Verificou-se o teor ideal de argamassa, em que, constatou-se visualmente a homogeneidade da mistura, observando-se a quantidade de argamassa, a densidade e a coesão. Verificou-se a consistência e a densidade, a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone, em que pôde-se notar a superfície sem a presença de poros; e constatou-se a coesão da mistura, através de batidas com a haste no tronco de cone, em que pôde-se perceber a presença de argamassa entre os grãos de agregado graúdo, que não se desprendem. Definiu-se o teor de argamassa em 57%. Ainda, obteve-se a massa específica dessa mistura, sendo 2,43 g/cm<sup>3</sup>, a qual se utilizou como base nos cálculos para determinação do consumo dos materiais por metro cúbico.

Através do teor ideal de argamassa, que após definido, deve ser constante para todos os traços, pôde-se obter os valores dos agregados e, conseqüentemente, o desdobramento do traço 1: a: p: a/agl., sendo material aglomerante: agregado miúdo: agregado graúdo: relação água/aglomerante (TABELA 16).

Tabela 16 - Traço unitário (1: a: p: a/agl.) – Método IPT/EPUSP Modificado

Resistência	Traço unitário
Nível A	1: 2,42: 2,58: 0,36
Nível B	1: 1,85: 2,15: 0,30
Nível C	1: 1,28: 1,72: 0,24

Fonte: Da autora (2017).

O consumo de aglomerantes é o resultado da relação entre a massa específica do concreto obtida experimentalmente a partir do traço 1:5 e os traços unitários dos agregados somado à relação água/aglomerante. Calculou-se a quantidade de cimento

considerando 93% e a quantidade de sílica ativa considerando 7% da quantidade total de material aglomerante, em massa.

Através do consumo de material aglomerante e do traço unitário, pode-se definir a quantidade de materiais, em massa, para execução de 1m<sup>3</sup> de concreto (TABELA 17).

Tabela 17 - Planilha de dosagem para 1m<sup>3</sup> de concreto – Método IPT/EPUSP Modificado

Resist.	Material agl. (kg)		Água (kg)	Agregados (kg)		Total (kg)	Relação a/agl.
	Cimento Portland	Sílica ativa		Graúdo	Miúdo		
Nível A	355	27	138	986	925	2431	0,36
Nível B	427	32	138	986	849	2431	0,30
Nível C	533	40	138	986	734	2431	0,24

Fonte: Da autora (2017).

Utilizou-se os agregados na condição SSS, assim como nas dosagens dos demais métodos, fazendo-se necessário descontar da quantidade total de água, a umidade dos agregados e a água contida no aditivo, para a produção do concreto. As quantidades de material utilizado para a produção são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Quantidade de material para execução do concreto – Método IPT/EPUSP Modificado

	Nível A	Nível B	Nível C
<b>Traço (1:m)</b>	1: 5	1: 4	1: 3
<b>Cimento (kg)</b>	7,21	8,65	10,82
<b>Areia (kg)</b>	18,93	17,36	15,02
<b>Brita (kg)</b>	20,27	20,27	20,28
<b>Água (l)</b>	2,27	2,27	2,27
<b>Sílica ativa (kg)</b>	0,54	0,65	0,81
<b>a/agl.</b>	0,36	0,30	0,24
<b>Aditivo (g)</b>	55,20	69,82	115,38

	Nível A	Nível B	Nível C
<b>Aditivo (%)</b>	0,77	0,81	1,07
<b>Abatimento (mm)</b>	95	110	120
<b>Consumo de aglomerante (kg/m<sup>3</sup>)</b>	382,23	458,68	573,35
<b>H (%)</b>	6	6	6

Fonte: Da autora (2017).

### 3.2.3 Caracterização do concreto no estado fresco

Realizou-se a coleta e preparação das amostras para a caracterização da mistura de concreto no estado fresco de acordo com as disposições da NBR NM 33/1998, da ABNT, que orienta a separação de 1,5 vezes a quantidade da mistura necessária para a realização do ensaio de abatimento, iniciando em até 5 minutos após a obtenção da amostra.

Para determinação da consistência da mistura, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*) de acordo com a NBR NM 67/1998, da ABNT. Para cada mistura, dosou-se a quantidade de aditivo superplastificante conforme verificou-se necessidade para obtenção do abatimento desejado, sem ultrapassar o ponto de saturação limite do aditivo, enquanto os demais parâmetros e materiais permaneceram fixos.

Utilizando um cimento de alta resistência inicial e relação água/aglomerante de 0,22, na Universidade de Sherbrooke, no Canadá, verificou-se que um concreto de 75 MPa no primeiro dia de idade, não conseguia manter o abatimento em 150 mm por mais de 15 minutos (AİTCIN, 1998). Alves (2000) definiu um abatimento de  $120 \pm 20$ mm, enquanto que, Oliveira (2012) não menciona o abatimento pretendido para CAR, mas os valores obtidos pelos métodos Aİtcin, Mehta-Aİtcin e IPT/EPUSP Modificado, estão entre 80 e 140mm. Para este trabalho, definiu-se um valor de abatimento baseado nas considerações dos estudos dos autores mencionados, de  $100 \pm 20$ mm. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 19, na qual pode-se observar que os valores encontram-se dentro da faixa estipulada.

Tabela 19 - Abatimento do concreto

<b>Abatimento (mm)</b>			
<b>Resistência</b>	<b>Aïtcin</b>	<b>Mehta-Aïtcin</b>	<b>IPT/EPUSP Modificado</b>
Nível A	95	95	95
Nível B	85	90	110
Nível C	85	100	120

Fonte: Da autora (2017).

Obteve-se a massa específica aparente da mistura de concreto através do ensaio e cálculo indicados na NBR 9833/2008, da ABNT. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 20, na qual pode-se observar que os concretos dosados para resistirem ao maior nível apresentam maior densidade, por conta do preenchimento dos poros, obtido através do maior consumo de cimento e, principalmente, de sílica ativa.

Tabela 20 - Massa específica aparente do concreto

<b>Massa específica (kg/m³)</b>			
<b>Resistência</b>	<b>Aïtcin</b>	<b>Mehta-Aïtcin</b>	<b>IPT/EPUSP Modificado</b>
Nível A	2359,9	2361,9	2431,1
Nível B	2369,8	2445,4	2470,1
Nível C	2456,6	2459,7	2491,6

Fonte: Da autora (2017).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Caracterização do concreto no estado endurecido**

Realizou-se a coleta e preparação das amostras para a caracterização do concreto no estado endurecido de acordo com as disposições da NBR NM 33/1998, da ABNT, que orienta a produção de uma amostra mínima de 30 litros para a realização do ensaio de resistência à compressão, iniciando em até 15 minutos após a obtenção da amostra.

Para caracterização da mistura de concreto no estado endurecido, realizou-se a moldagem e a cura dos corpos-de-prova (CP's) conforme as recomendações da NBR 5738/2015, da ABNT. Moldou-se seis corpos-de-prova para cada traço de cada método, afim de romper dois para cada idade determinada.

As idades de rompimento descritas na norma e mais utilizadas, são 24 horas, 3, 7, 28, 63 e 91 dias. Flor (1994) realizou os rompimentos dos CP's aos 7 dias e Oliveira (2012) aos 7 e 28 dias. Alves (2000) e Cremonini et al. (2001) realizaram o ensaio nas idades de 3, 7 e 28 dias. De acordo com Cremonini et al. (2001), a resistência à compressão aos 3 dias de idade corresponde à aproximadamente 70% da resistência alcançada aos 28 dias. A partir disso, as idades especificadas para ruptura dos CP's foram 3, 7 e 28 dias.

Os corpos-de-prova utilizados são cilíndricos, com dimensão básica (diâmetro) de 100 e altura de 200 mm. A partir dos valores de abatimento, efetuou-se a escolha do método de adensamento, sendo de forma manual; e, a partir desse fator e da escolha do tipo de CP, definiu-se a moldagem em duas camadas de 12 golpes cada. A moldagem dos CP's deu-se no local onde ficaram armazenados durante a cura

inicial, por 24 horas, até a desforma. Até o rompimento nas idades especificadas, foram mantidos em câmara para que houvesse cura úmida.

Os CP's devem ser preparados para o ensaio de compressão por processo de retificação ou capeamento, de modo que as bases se tornem superfícies planas. Mindess (apud ALVES, 2000) afirma que a preparação deve ser executada para que haja a distribuição de carga de maneira uniforme na área de contato entre o CP e o equipamento. Para a realização dos ensaios deste trabalho, todos os CP's foram retificados e, antes de iniciar o ensaio, as faces dos CP's foram limpas e secas.

Para verificação da resistência à compressão, efetuou-se o rompimento dos corpos-de-prova, atendendo aos requisitos da NBR 5739/2007, da ABNT. Os resultados do ensaio dos CP's moldados de acordo com o método Aïtcin são apresentados na Tabela 21, de acordo com Mehta-Aïtcin são apresentados na Tabela 22, e conforme o método IPT/EPUSP Modificado são apresentados na Tabela 23.

Tabela 21 - Resistência à compressão – Método Aïtcin

Resistência à compressão (MPa)			
Idade	Nível A	Nível B	Nível C
3 dias	54,38	61,11	67,52
	54,94	61,86	67,76
7 dias	63,29	72,75	74,93
	65,33	73,05	78,56
28 dias	77,01	85,11	88,68
	77,92	87,01	89,35

Fonte: Da autora (2017).

Tabela 22 - Resistência à compressão – Método Mehta-Aïtcin

Resistência à compressão (MPa)			
Idade	Nível A	Nível B	Nível C
3 dias	43,25	62,29	74,06
	43,32	63,83	77,81
7 dias	55,13	76,44	81,62
	55,88	78,30	82,39
28 dias	66,25	92,28	92,79
	68,76	93,28	99,15

Fonte: Da autora (2017).

Tabela 23 - Resistência à compressão – Método IPT/EPUSP Modificado

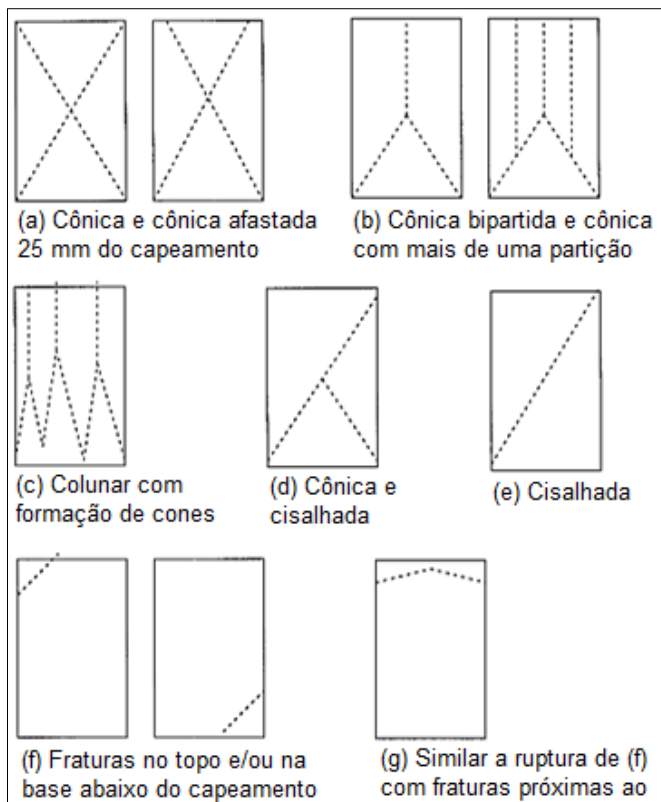
Resistência à compressão (MPa)			
Idade	Nível A	Nível B	Nível C
3 dias	61,29	73,47	89,46
	62,18	76,46	91,75
7 dias	66,92	80,44	93,43
	67,44	80,90	94,52
28 dias	82,04	93,37	99,60
	82,90	96,35	104,39

Fonte: Da autora (2017).

#### 4.1.1 Ruptura

A Figura 7 apresenta os diferentes tipos de ruptura em CP's, de acordo com a NBR 5739/2007, da ABNT.

Figura 7 - Tipos de ruptura de corpos-de-prova

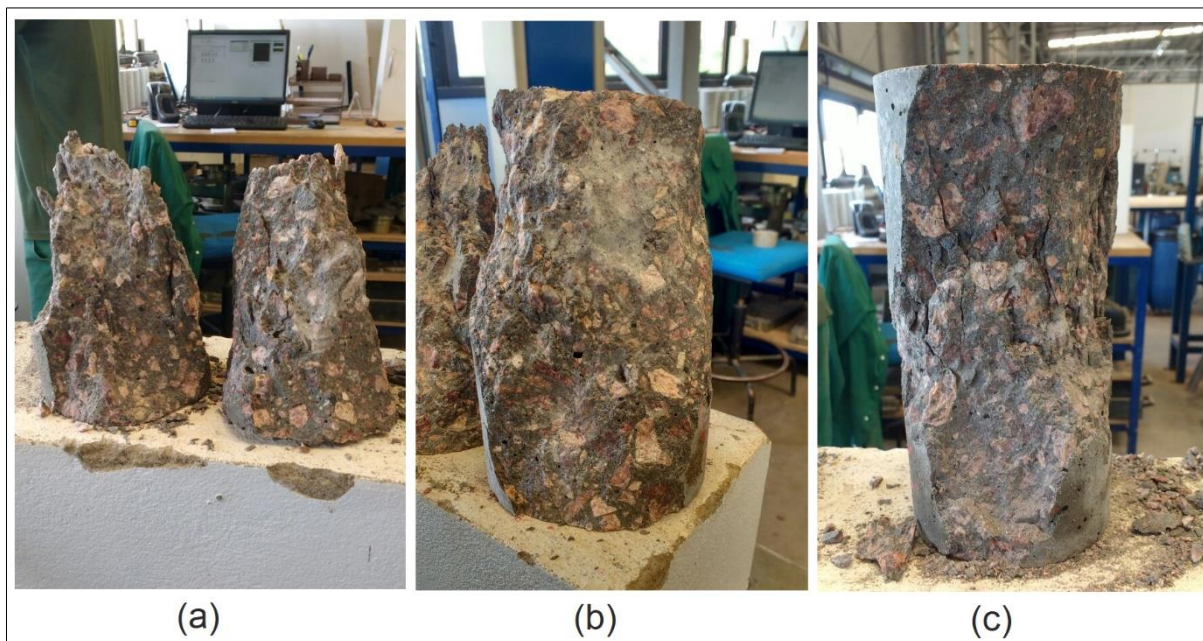


Fonte: Adaptado pela autora com base em NBR 5739 (2007).

Observou-se que todos os CP's romperam de maneira semelhante e que a ruptura pode ser considerada cônica, devido ao cisalhamento. Percebeu-se que, em alguns CP's encontrou-se material aglomerante anidro no interior dos CP's, em que não houve hidratação, devido aos elevados consumos de cimento e sílica ativa e às baixas relações água/aglomerante. Através de uma breve análise, pode-se observar ainda, que os planos de ruptura não se deram na zona de transição entre a pasta e o agregado, se propagando através das partículas do agregado graúdo, devido à utilização da sílica ativa, o que reforçou a zona de transição (FIGURA 8). Cabe salientar que não se observou rupturas devido a falhas na retificação das bases dos CP's.



Figura 8 - Ruptura cônica (a); cimento anidro no interior do CP (b); e plano de ruptura se propagando através das partículas do agregado (c).



Fonte: Da autora (2017).

#### 4.1.2 Análise dos resultados

Através dos resultados obtidos na caracterização do concreto no estado endurecido, verificou-se que nenhum método de dosagem obteve todas as resistências de acordo com as quais foram dosados. Os concretos dosados para atingirem 60 MPa, pelos métodos Aïtcin e IPT/EPUSP Modificado, atingiram aproximadamente 80 MPa e os concretos dosados para atingirem 80 MPa, pelos métodos Mehta-Aïtcin e IPT/EPUSP Modificado, atingiram mais de 90 MPa. Pode-se observar que o método proposto por Aïtcin variou 11,43 MPa da menor resistência encontrada à maior; o método Mehta-Aïtcin apresentou a maior variação, de 30,39 MPa; e o IPT/EPUSP Modificado apresentou uma variação de 21,49 MPa. Este fato, em uma situação de aplicação em obra, em que se tem uma resistência mais elevada do que a especificada e um consumo de material além do necessário para esta resistência, pode representar aumento de custo e desperdício de material.

Supõe-se que tal fato pode ter sido influenciado pelos traços obtidos serem uma estimativa para alcançar os níveis de resistência escolhidos. Além disso, para um nível de resistência, dosado pelos diferentes métodos, não seriam obtidos os mesmos valores, pois os materiais são os mesmos, mas os traços de cada método para um

mesmo nível de resistência, apresentam valores diferentes, o que ocorre devido ao fato de cada método dispor de parâmetros diferentes a serem considerados na dosagem. Ainda, supõe-se que pode ter sido influenciado pelos concretos terem sido executados em dias e horários diferentes, em que as condições climáticas e a umidade relativa do ar eram distintas, sendo estes, fatores que podem influenciar na água de amassamento e na condição de umidade dos agregados, apesar dos cuidados para que estivessem nas condições determinadas. Presume-se ainda, que o grau de adensamento dos corpos-de-prova pode ter influenciado nos resultados.

A partir destes dados, pôde-se verificar que, para todos os métodos de dosagem, a resistência à compressão aos 3 dias representava pelo menos 60% da resistência obtida aos 28 dias, o que era esperado, já que o elevado ganho de resistência em idades iniciais é uma característica do concreto de alta resistência. As considerações e a análise acerca dos resultados encontrados na caracterização do concreto no estado endurecido, através de ensaios de rompimento de corpos-de-prova, por cada um dos métodos, são apresentadas a seguir. Para tal fim, selecionou-se os valores potenciais.

#### **4.1.2.1 Método Aïtcin**

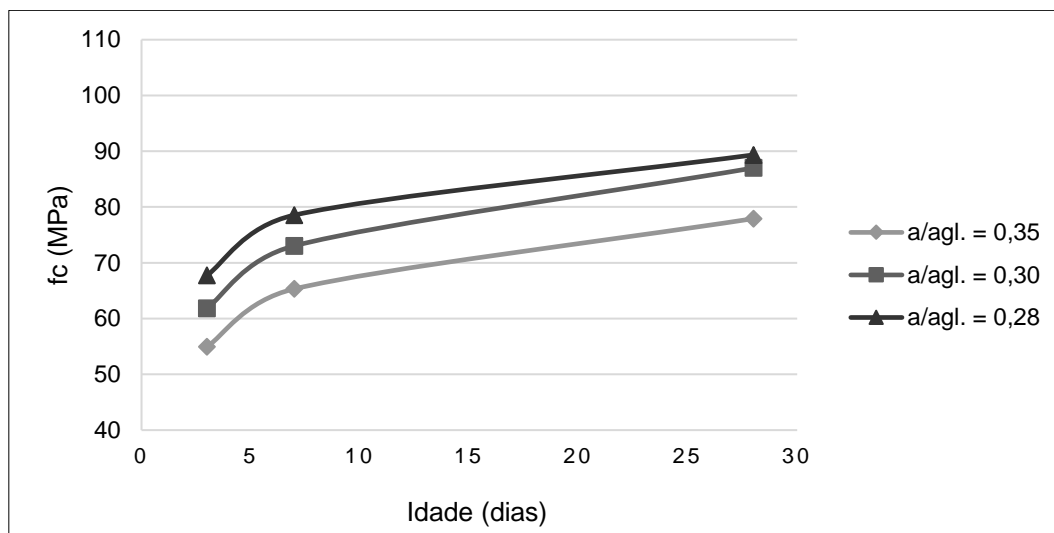
O Gráfico 5 mostra a curva que representa a evolução da resistência à compressão com o tempo, para as diferentes relações água/aglomerante (a/agl.), sendo estas 0,35; 0,30 e 0,28. Percebe-se que a resistência à compressão aumenta conforme diminui a relação a/agl., o que era esperado, já que maiores consumos de cimento e, principalmente, de sílica ativa, preenchem os poros e tornam o concreto mais denso.

A Tabela 24 apresenta o ganho de resistência aos 3 e 7 dias, em comparação com a resistência alcançada aos 28 dias, sendo esta considerada 100%. Para uma relação a/agl. de 0,35 obteve-se aproximadamente 71% e 84%, para as idades de 3 e 7 dias, respectivamente, sendo valores similares aos encontrados por Alves (2000), de 72% e 83%.

Os valores obtidos demonstram que, para todos os níveis de resistência, há evolução de mais de 70% da idade aos 3 dias e 83% aos 7 dias. Nota-se ainda, que quanto menor for a relação a/agl., maior será o ganho inicial de resistência, ou seja,

conforme aumenta essa relação, o ganho em idades iniciais diminui. Ainda assim, os valores são elevados para a idade de 3 dias, pela utilização do tipo de cimento de alta resistência inicial.

Gráfico 5 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Aïtcin



Fonte: Da autora (2017).

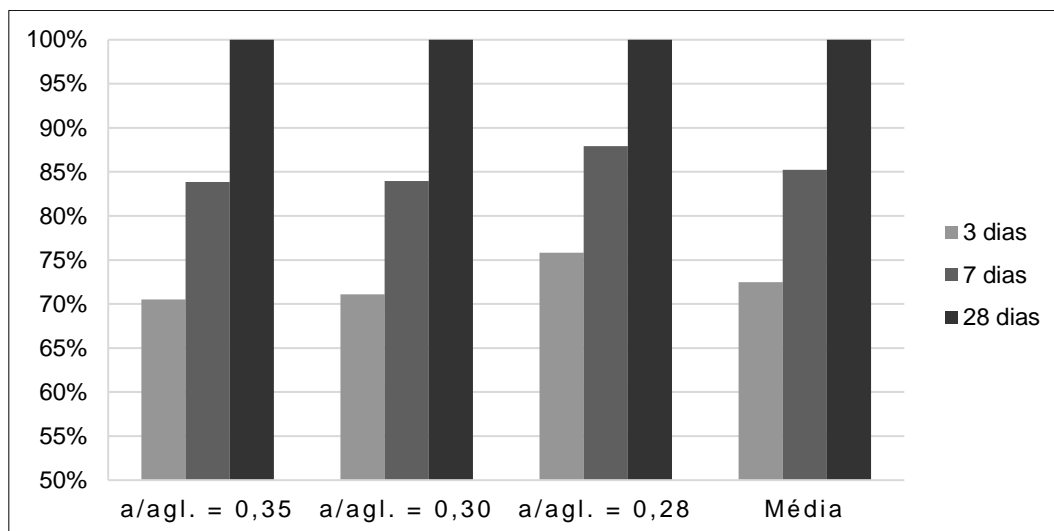
Tabela 24 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Aïtcin

Resistência (%)			
a/agl.	3 dias	7 dias	28 dias
0,35	70,51	83,84	100,00
0,30	71,10	83,96	100,00
0,28	75,84	87,92	100,00

Fonte: Da autora (2017).

Conforme apresentado no Gráfico 6, verifica-se que a resistência aos 3 dias representa uma média de 72,48% da resistência final obtida aos 28 dias para as relações  $a/agl.$  apresentadas e, aos 7 dias, essa evolução representa 85,24%. Alves (2000) obteve valores médios parecidos aos 7 dias, de aproximadamente 86%, porém aos 3 dias já apresentava, em média, aproximadamente 76%.

Gráfico 6 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Aïtcin



Fonte: Da autora (2017).

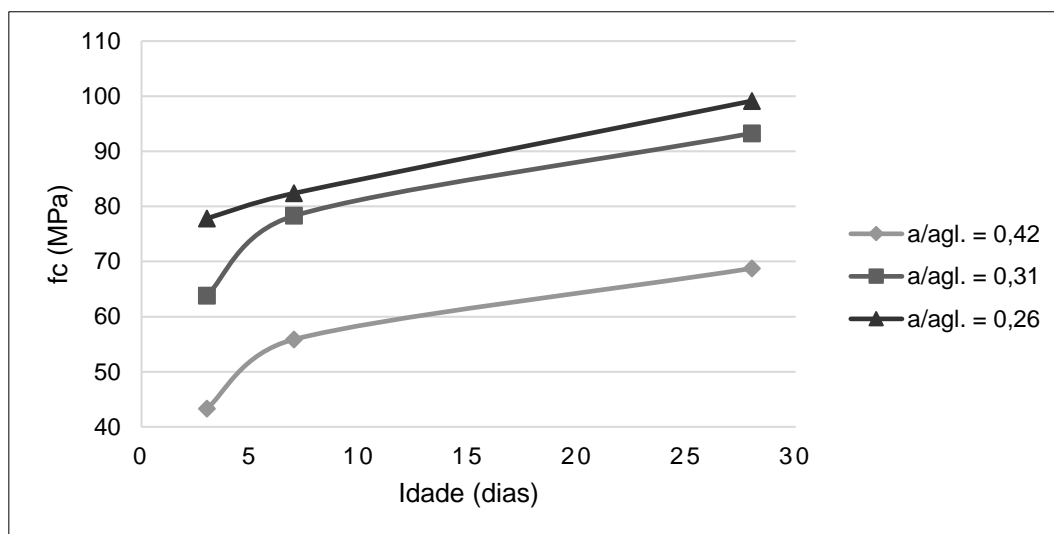
#### 4.1.2.2 Método Mehta-Aïtcin

O Gráfico 7 mostra a curva que representa a evolução da resistência à compressão com o tempo, para as diferentes relações água/aglomerante (a/agl.), sendo estas 0,42; 0,31 e 0,26. Constata-se que a resistência à compressão é diretamente proporcional à idade e inversamente proporcional à relação a/agl., assim como observou-se na apresentação dos resultados do método anterior. Para a menor relação a/agl. pôde-se verificar uma pequena variação da curva, que apresenta um comportamento mais linear que as demais, devido a pequena diferença entre as resistências aos 3 e 7 dias, de apenas 4,62% em relação aos 28 dias.

A Tabela 25 apresenta o ganho de resistência aos 3 e 7 dias, em comparação com a resistência alcançada aos 28 dias, sendo esta considerada 100%. Para uma relação a/agl. de 0,31 obteve-se aproximadamente 68% e 84%, para as idades de 3 e 7 dias, respectivamente, sendo a evolução aos 7 dias semelhante a encontrada por Alves (2000), de 82%, porém, diferente dos resultados encontrados, aos 3 dias já apresentava 73% da resistência final. Para uma relação a/agl. de 0,26 obteve-se aproximadamente 78% e 83%, para as idades de 3 e 7 dias, respectivamente, sendo a evolução aos 7 dias semelhante a encontrada por Alves (2000), de 81%, apesar de

diferir dos resultados encontrados aos 3 dias, em que apresentava apenas 73% da resistência obtida aos 28 dias.

Gráfico 7 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Mehta-Aïtcin



Fonte: Da autora (2017).

Tabela 25 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Mehta-Aïtcin

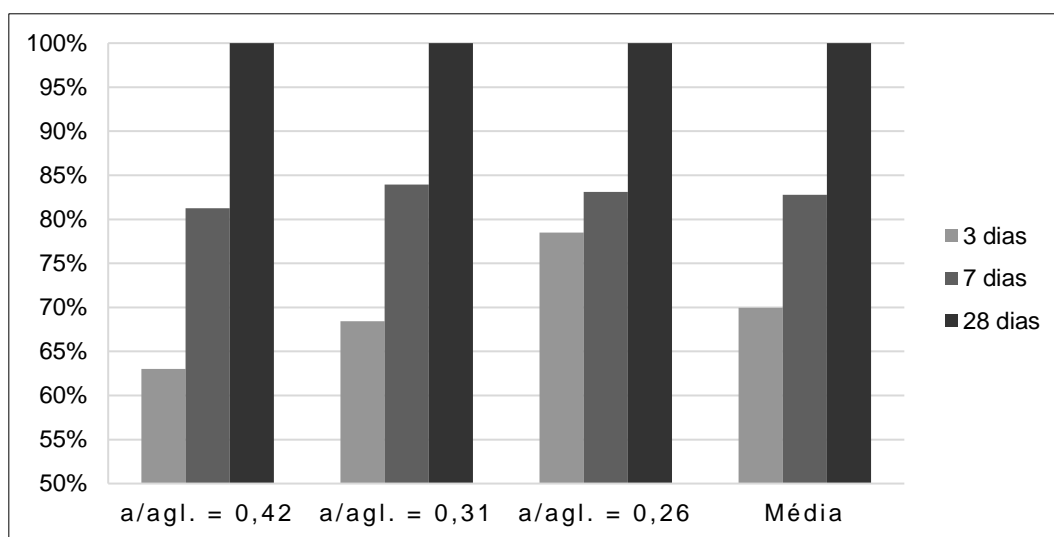
a/agl.	Resistência (%)		
	3 dias	7 dias	28 dias
0,42	63,00	81,27	100,00
0,31	68,43	83,94	100,00
0,26	78,48	83,10	100,00

Fonte: Da autora (2017).

Os valores obtidos demonstram que, para todos os níveis de resistência, há evolução de pelos menos 63% da idade aos 3 dias e 81% aos 7 dias. Assim como para o método apresentado anteriormente, pode-se notar que, quanto menor for a relação  $a/agl.$ , maior será o ganho de resistência inicial, ou seja, conforme aumenta essa relação, os valores de resistências aos 3 dias se afastam dos valores de 28 dias.

Conforme apresentado no Gráfico 8, pode-se constatar que a resistência aos 3 dias representa uma média de 69,97% da resistência final obtida aos 28 dias para as relações a/agl. apresentadas e, aos 7 dias, essa evolução representa 82,77%. Cremonini et al (2001), obtiveram valores médios semelhantes aos encontrados para a idade de 3 dias, de 70%, porém aos 7 dias já alcançava em média 86%. Alves (2000) obteve valores médios mais elevados aos 3 dias, de aproximadamente 75%, porém aos 7 dias alcançou valores similares ao deste trabalho, de aproximadamente 82%.

Gráfico 8 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método Mehta-Aïtcin

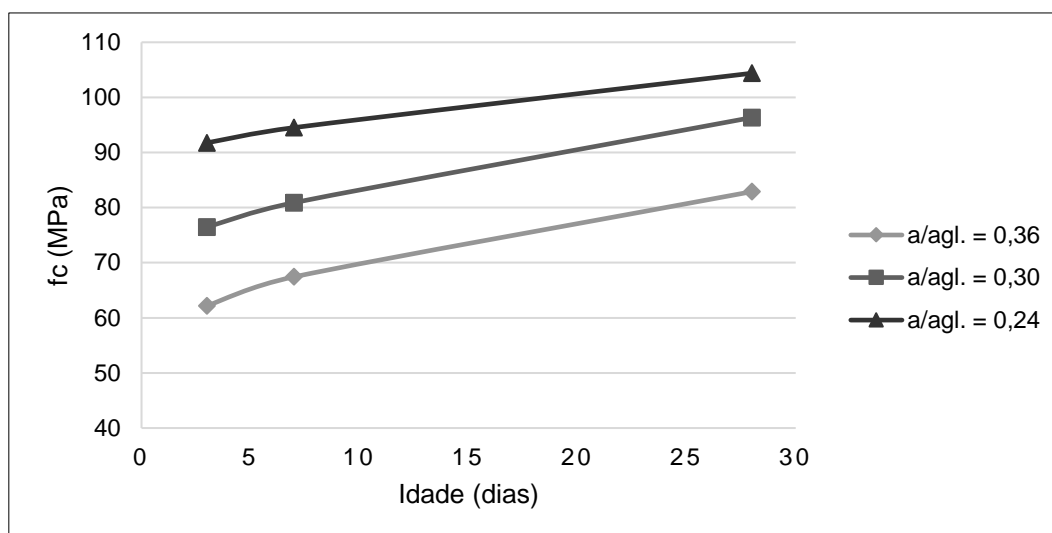


Fonte: Da autora (2017).

#### 4.1.2.3 Método IPT/EPUSP Modificado

O Gráfico 9 mostra a curva que representa a evolução da resistência à compressão com o tempo, para as diferentes relações água/aglomerante (a/agl.), sendo estas 0,36; 0,30 e 0,24. Identifica-se que a resistência à compressão cresce conforme aumenta a idade e diminui a relação a/agl., assim como observou-se para os demais métodos. Constata-se ainda, que as curvas para os concretos dosados por este método, se apresentam com um comportamento mais linear, pelo fato das resistências nas idades de 3 e 7 dias não indicarem diferença significativa entre as mesmas, mostrando valores próximos.

Gráfico 9 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método IPT/EPUSP Modificado



Fonte: Da autora (2017).

A Tabela 26 apresenta o ganho de resistência aos 3 e 7 dias, em comparação com a resistência alcançada aos 28 dias, sendo esta considerada 100%. Os valores obtidos demonstram que, para todos os níveis de resistência, há evolução de pelos menos 75% da idade aos 3 dias e 81% aos 7 dias. Assim como para os demais métodos, verifica-se que, quanto maior for a relação  $a/agl.$ , menor será o ganho de resistência nas idades iniciais e, com o aumento dessa relação, os valores de resistências aos 3 dias se aproximam dos valores obtidos aos 28 dias.

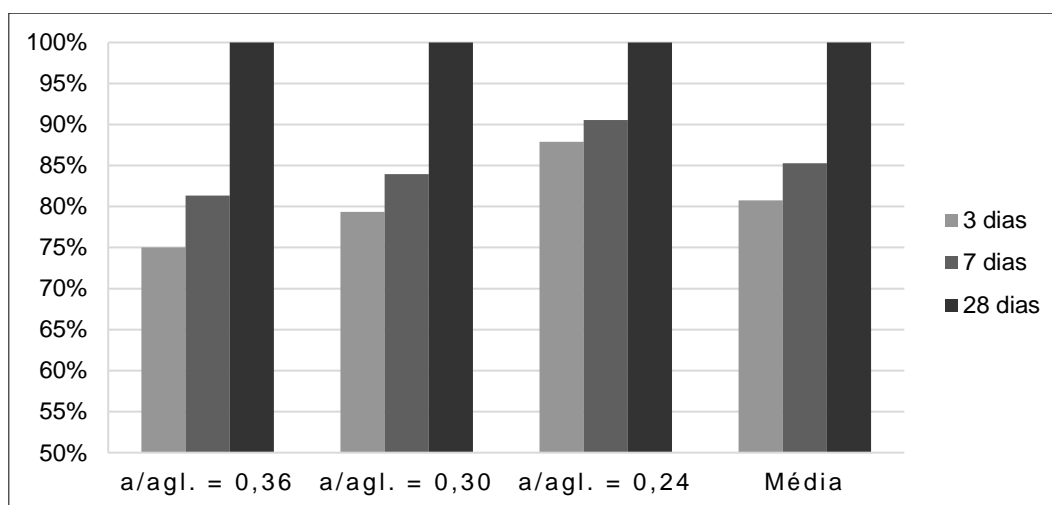
Tabela 26 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método IPT/EPUSP Modificado

$a/agl.$	Resistência (%)		
	3 dias	7 dias	28 dias
0,36	75,01	81,35	100,00
0,30	79,36	83,96	100,00
0,24	87,89	90,55	100,00

Fonte: Da autora (2017).

Conforme apresentado no Gráfico 10, constata-se que a resistência aos 3 dias representa uma média de 80,75% da resistência final obtida aos 28 dias para as relações a/agl. apresentadas e, aos 7 dias, essa evolução representa 85,29%, sendo valores semelhantes aos encontrados por Cremonini et al. (2001) que constataram que a resistência média aos 3 dias era de 79% e aos 7 dias, de 86% da resistência obtida aos 28 dias. Os valores obtidos reforçam o que foi dito anteriormente, de que as curvas para este método apresentaram um comportamento semelhante à linearidade, principalmente para a relação a/agl. mais baixa, que apresenta uma variação de 2,66% entre as idades de 3 e 7 dias, em relação aos 100% dos 28 dias.

Gráfico 10 - Evolução da resistência à compressão com a idade – Método IPT/EPUSP Modificado



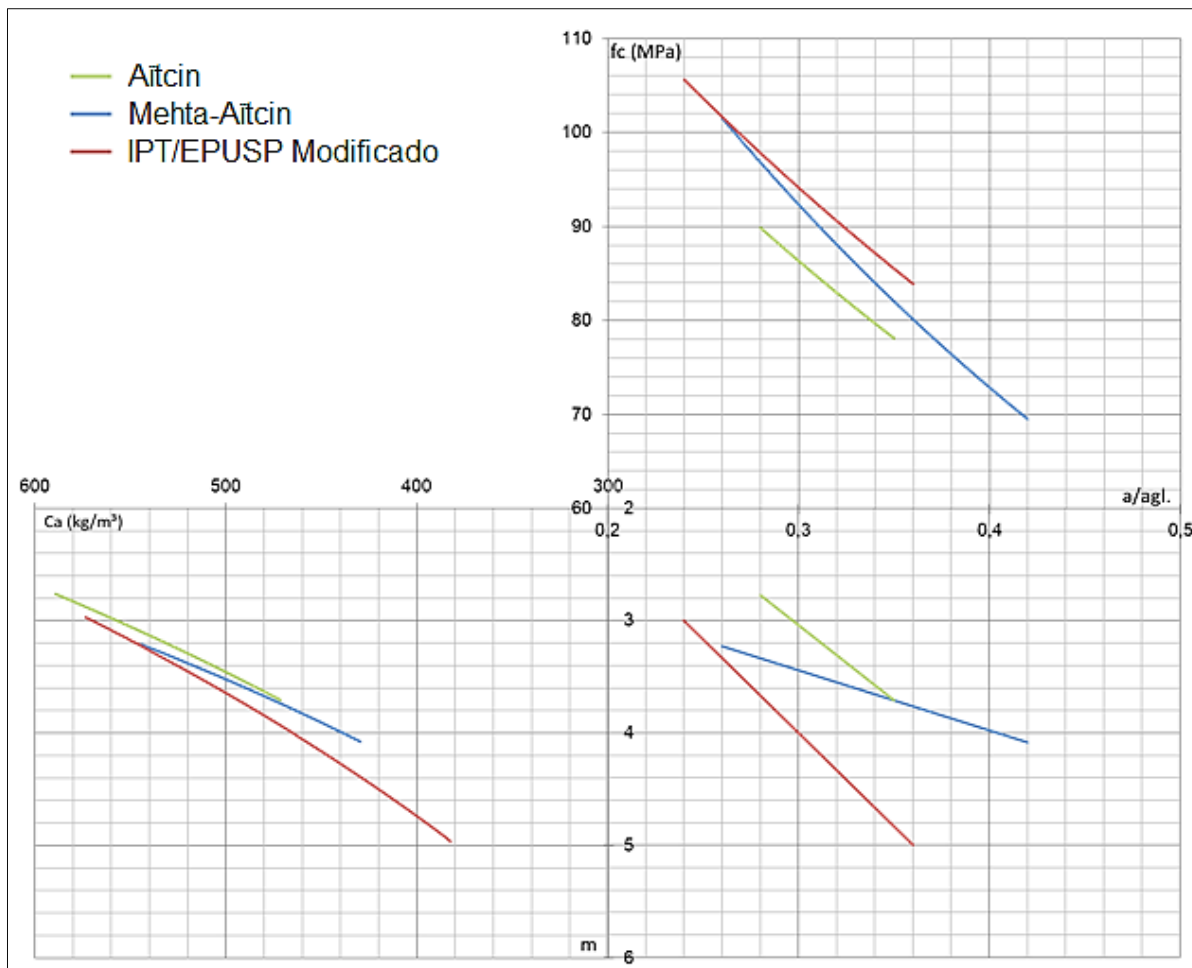
Fonte: Da autora (2017).

#### 4.2 Diagrama de dosagem e determinação do traço final

O diagrama de dosagem apresenta as curvas para os três métodos, que relaciona a resistência à compressão obtida no ensaio de caracterização ( $f_c$ ) em MPa; a relação água/aglomerante (a/agl.); a quantidade de agregados totais (m), em massa, em relação ao material aglomerante; e o consumo de material aglomerante (Ca) em kg/m<sup>3</sup>, que considera o cimento Portland e a sílica ativa (FIGURA 9).



Figura 9 - Diagrama de dosagem



Fonte: Da autora (2017).

As classes de resistência à compressão escolhidas para comparação dos custos foram definidas variando em uma faixa de 60 a 100 MPa, com intervalos de 5 MPa. O método Aitcin atingiu variação dentro desta faixa de 80 a 85 MPa; o método Mehta-Aitcin, atingiu uma variação entre 70 e 95 MPa; e o método IPT/EPUSP Modificado, entre 85 e 100 MPa. As curvas não podem ser extrapoladas, pois foram obtidas de maneira experimental e não apresentam comportamento linear, portanto, apenas pôde-se realizar uma comparação de custo, entre os três métodos, para a classe de resistência de 85 MPa.

A partir do diagrama de dosagem, obteve-se o consumo de aglomerante, a relação água/aglomerante e a quantidade de agregados totais. Sabendo que o teor de argamassa permaneceu constante para todos os métodos, os teores de agregado

gráudo e miúdo foram definidos através de equação que relaciona este parâmetro e a quantidade de agregados totais.

Conhecendo estes valores, pôde-se então definir os traços unitários finais 1: a: p: a/agl., sendo material aglomerante: agregado miúdo: agregado gráudo: relação água/aglomerante, para as classes às quais ficaram dentro da faixa de resistência à compressão alcançada, para cada método. A Tabela 27 apresenta estes traços para os métodos Aïtcin, Mehta-Aïtcin e IPT/EPUSP Modificado. Observa-se que, conforme há o crescimento da resistência à compressão, o consumo de material aglomerante aumenta e o teor de agregados gráudo e miúdo diminui, bem como, a relação água/aglomerante.

Tabela 27 - Traços unitários finais (1: a: p: a/agl.)

Traço unitário			
Resistência (MPa)	Aïtcin	Mehta-Aïtcin	IPT/EPUSP Modificado
70	-	1: 1,79: 2,31: 0,42	-
75	-	1: 1,68: 2,22: 0,39	-
80	1: 1,32: 2,28: 0,34	1: 1,62: 2,18: 0,36	-
85	1: 1,12: 2,08: 0,31	1: 1,51: 2,09: 0,33	1: 2,31: 2,49: 0,35
90	-	1: 1,46: 2,04: 0,31	1: 2,08: 2,32: 0,32
95	-	1: 1,42: 1,99: 0,29	1: 1,85: 2,15: 0,30
100	-	-	1: 1,57: 1,94: 0,27

Fonte: Da autora (2017).

As Tabelas 28, 29 e 30 apresentam o consumo de materiais para dosagens de 1m<sup>3</sup> de concreto, para os métodos Aïtcin, Mehta-Aïtcin e IPT/EPUSP Modificado, respectivamente. Esses dados da dosagem são baseados nos valores encontrados de consumo de material aglomerante e nos traços finais das classes de resistência abrangidas por cada método.

Tabela 28 - Dosagem para 1m<sup>3</sup> de concreto – Método Aïtcin

Resistên- cia (MPa)	Material agl. (kg)		Água (kg)	Agregados (kg)		Total (kg)	Relação a/agl.
	Cimento Portland	Sílica ativa		Graúdo	Miúdo		
80	446	34	163	1093	635	2371	0,34
85	493	37	164	1102	594	2390	0,31

Fonte: Da autora (2017).

Tabela 29 - Dosagem para 1m<sup>3</sup> de concreto – Método Mehta-Aïtcin

Resistên- cia (MPa)	Material agl. (kg)		Água (kg)	Agregados (kg)		Total (kg)	Relação a/agl.
	Cimento Portland	Sílica ativa		Graúdo	Miúdo		
70	400	30	181	994	769	2374	0,42
75	419	32	176	1000	755	2381	0,39
80	428	32	166	1001	747	2374	0,36
85	456	34	162	1022	742	2416	0,33
90	465	35	155	1020	730	2405	0,31
95	484	36	151	1037	731	2439	0,29

Fonte: Da autora (2017).

Tabela 30 - Dosagem para 1m<sup>3</sup> de concreto – Método IPT/EPUSP Modificado

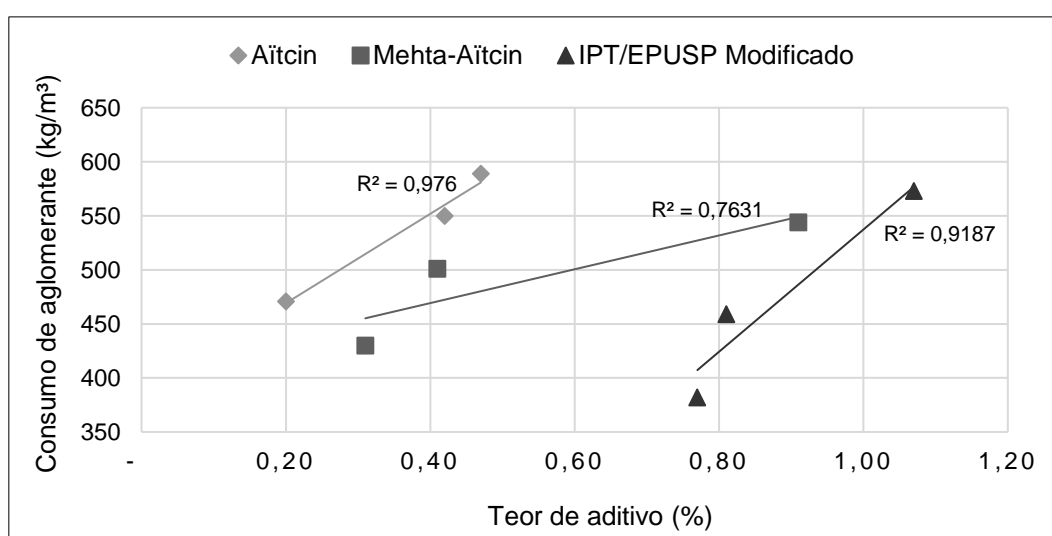
Resistên- cia (MPa)	Material agl. (kg)		Água (kg)	Agregados (kg)		Total (kg)	Relação a/agl.
	Cimento Portland	Sílica ativa		Graúdo	Miúdo		
85	372	28	140	998	922	2460	0,35
90	400	30	138	998	894	2460	0,32
95	428	32	138	989	851	2438	0,30
100	474	36	138	987	798	2433	0,27

Fonte: Da autora (2017).

#### 4.2.4 Teor de aditivo para o traço final

O teor de aditivo é obtido de modo experimental, conforme se executa a mistura, definido a partir do abatimento fixado e, por este motivo, não há um modelo matemático que defina sua utilização. Para comparação dos custos, realizou-se uma estimativa deste valor, através da elaboração de um gráfico que relaciona o consumo de material aglomerante com este parâmetro, em que se assumiu que o comportamento seja linear (GRÁFICO 11).

Gráfico 11 - Teor de aditivo



Fonte: Da autora (2017).

Na Tabela 31 são apresentados os valores estimados de teor de aditivo obtidos através do gráfico. Constatou-se na execução do concreto que, para as dosagens que pretendiam maiores resistências, se exigiu maiores quantidades de aditivo, por conta do aumento no consumo de material aglomerante e da diminuição da quantidade de água. Sendo assim, essas relações se mantêm para a estimativa, por ser criada com base nestes parâmetros.

Tabela 31 - Teor de aditivo

Resistência (MPa)	Teor de aditivo (%)		
	Aïtcin	Mehta-Aïtcin	IPT/EPUSP Modificado
70	-	0,31	-
75	-	0,33	-
80	0,23	0,35	-
85	0,35	0,53	0,77
90	-	0,60	0,81
95	-	0,73	0,86
100	-	-	0,95

Fonte: Da autora (2017).

### 4.3 Custo dos materiais componentes

O custo dos materiais que compõe o concreto foi obtido a partir de uma pesquisa de mercado, em que se obteve dois preços, tendo como referência os valores de novembro de 2017, sendo escolhido o menor custo para cada material. Na Tabela 32 são apresentados o custo de compra no mercado e o custo por quilogramas, para que seja possível calcular os traços, já que os mesmos são apresentados em massa.

Tabela 32 - Custo dos materiais

Materiais	Custo de compra		Custo por quilograma	
Agregado miúdo	78,00	R\$/m³	0,03	R\$/kg
Agregado graúdo	80,00	R\$/m³	0,03	R\$/kg
Sílica ativa	42,00	R\$/60kg	0,70	R\$/kg
Cimento	31,50	R\$/50kg	0,63	R\$/kg
Superplastificante	12,50	R\$/kg	12,50	R\$/kg

Fonte: Da autora (2017).

#### 4.4 Custo do concreto

A partir dos dados de dosagem para 1m<sup>3</sup> de concreto, teor de aditivo e do custo dos materiais componentes, obteve-se o custo por metro cúbico (R\$/m<sup>3</sup>) para cada classe de resistência, para os métodos estudados. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Custo por m<sup>3</sup> por classe de resistência

Custo por metro cúbico (R\$/m <sup>3</sup> )			
Resistência (MPa)	Aïtcin	Mehta-Aïtcin	IPT/EPUSP Modificado
70	-	340,24	-
75	-	354,51	-
80	368,76	362,12	-
85	408,41	393,16	346,70
90	-	403,81	368,74
95	-	426,32	391,84
100	-	-	432,42

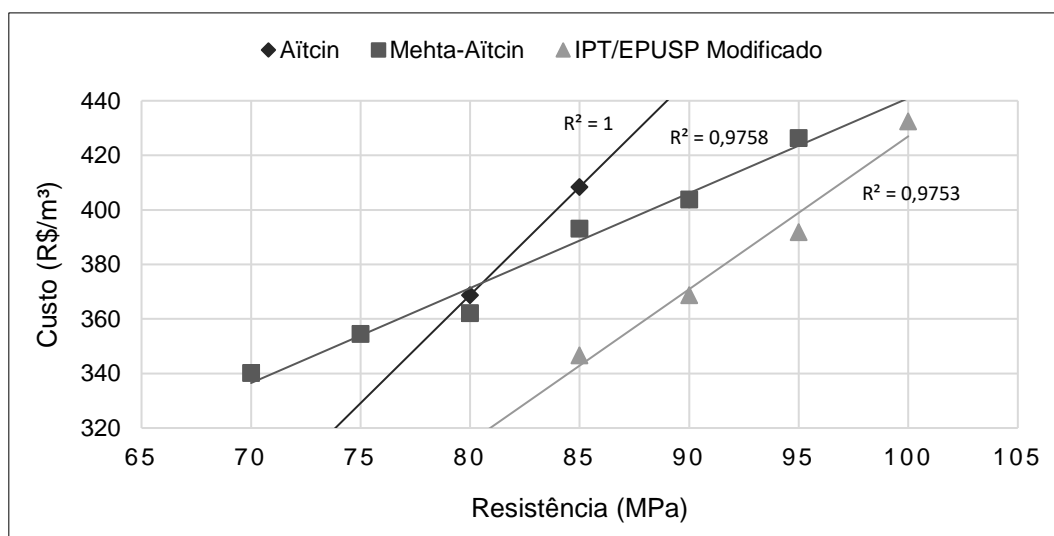
Fonte: Da autora (2017).

Conforme apresentado nos resultados, observando os valores de cada método, os traços com maior resistência à compressão são os que apresentam maior consumo de cimento e sílica ativa. Sabe-se que quanto maior for esse consumo e menor for a relação água/aglomerante, maior será a demanda de superplastificante. Por ser o material com o custo mais elevado, pôde-se observar então, que o traço mais rico de cada método, apresenta o maior custo.

O Gráfico 12 apresenta o custo por m<sup>3</sup> para as classes de resistência à compressão especificadas. Para a classe de 85 MPa, a única que cabe comparação entre todos os métodos, observa-se que o método Aïtcin apresenta custo mais elevado, seguido do método Mehta-Aïtcin; sendo assim, conclui-se que o método IPT/EPUSP Modificado é o mais vantajoso economicamente. Ainda, é possível destacar que para outras comparações, esta conclusão segue sendo válida, para todas as classes abrangidas por cada método. Os resultados se apresentam

coerentes com os obtidos por Oliveira (2012), que comparou diversos métodos, incluindo os estudados neste trabalho e concluiu que, para uma faixa de 55 a 90 MPa, o método IPT/EPUSP Modificado foi o que apresentou os melhores resultados quanto ao custo por  $\text{m}^3$ .

Gráfico 12 – Custo por  $\text{m}^3$  em função da resistência à compressão



Fonte: Da autora (2017).

Percebe-se que há uma tendência de inversão de custos na classe de 80 MPa, entre os métodos Aïtcin e Mehta-Aïtcin. Apesar disso, é válido destacar que, para o método Aïtcin, possivelmente a reta obtida não representa o que ocorreria de fato, por haverem apenas dois pontos para traçá-la, o que torna difícil assumir estes valores como uma tendência para o método. No caso de apenas mais uma verificação, já poderíamos admitir mais validade aos resultados.

O método IPT/EPUSP Modificado é o mais viável economicamente, apesar de apresentar uma taxa de crescimento do custo por classe, mais elevada que a taxa de crescimento do método Mehta-Aïtcin. A tendência é que os métodos se aproximem e encontrem valores parecidos após a classe de 100 MPa, a partir da qual pode-se observar uma tendência de inversão, apesar de não ser possível afirmar que este fato aconteceria, pois, para isso, seriam necessários mais ensaios que previssem a dosagem de concretos com resistências superiores às estudadas.

## 5 CONCLUSÕES

A utilização do concreto de alta resistência (CAR) tem sido estudada por diversos pesquisadores, pois apresenta diversas vantagens em comparação à mistura de concreto convencional, sendo potencialmente mais vantajosa economicamente.

Os métodos específicos para dosagem de concretos de alta resistência apresentados neste trabalho, diferem entre si em sua aplicação, partindo de escolhas iniciais relacionadas a parâmetros diferentes e seguindo etapas distintas para o desenvolvimento. Através da caracterização dos materiais, pôde-se definir todos os parâmetros necessários acerca das características dos materiais, para aplicação dos métodos de dosagem.

Os métodos e as resistências requeridas foram escolhidos e os métodos foram aplicados, para obtenção do traço inicial e da quantidade de material necessária para a execução. A verificação da conformidade do concreto foi realizada e avaliada a partir da determinação do abatimento, sendo que todos os traços se encontraram dentro dos limites estabelecidos e os corpos-de-prova puderam ser moldados.

Foram realizadas as rupturas dos corpos-de-prova nas idades determinadas e os valores de resistências alcançados não coincidiram com os valores de resistência requeridos, constatada essa variação nas dosagens realizadas por todos os métodos. Para todos os traços obtidos por todos os métodos, aos 3 dias, o concreto já havia desenvolvido pelo menos 60% da resistência final, obtida aos 28 dias, característica do concreto de alta resistência.



Foram escolhidas classes de resistência para que pudesse haver uma comparação entre os métodos, havendo a necessidade da elaboração do diagrama de dosagem, para obtenção do traço destas classes, que foram obtidos a partir das curvas. Porém, o fato das dosagens não atingirem as resistências estipuladas, limitou a análise dos resultados, pois esperava-se obter diversas classes de comparação entre os três métodos, sendo que foi possível comparar somente uma.

Os custos dos materiais componentes das misturas foram obtidos através de pesquisa de mercado, permitindo avaliar o custo do metro cúbico do concreto para cada classe de resistência definida, para cada método de dosagem. Foi possível concluir então, que o método IPT/EPUSP Modificado se apresentou como o mais eficiente economicamente, seguido do método Mehta-Aïtcin e o menos econômico, sendo o Aïtcin, para todas as classes de resistência abrangidas por cada método.

Para resistências acima de 100 MPa, em que a tendência seria que o método Mehta-Aïtcin passasse a ser o mais eficiente, fazem-se necessários estudos para resistências superiores às estudadas, para verificação e possível validação dessa tendência; e faz-se necessário o estudo de mais traços para o método Aïtcin, para o qual obteve-se apenas duas classes de resistência, dificultando a verificação da tendência do custo do metro cúbico para este método.

## REFERÊNCIAS

American Concrete Institute. **Committee 363**: Report on High-Strength Concrete. ACI, 1992.

\_\_\_\_\_. **Committee 363**: Report on High-Strength Concrete. ACI, 2010.

AÏTCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. London: E & FN Spon, 1998. 591 p.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, abr. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 33:** Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. de. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes.** 2002. 456 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, jul. 2002.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 10-21, jan./mar. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000100010002>>. Acesso em: 24 out. 2017.

CHEMIN, B. F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos:** planejamento, elaboração e apresentação. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015. E-book. Disponível em: <<http://www.univates.br/biblioteca>>. Acesso em: 25 out. 2017.

CREMONINI, R. A. et al. Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001, 16 p.

DAL MOLIN, D. C. C.; WOLF, J. Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alta resistência em edifícios altos. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 10., 1990, Gramado. **Anais...** Porto Alegre: SERGS, 1990. p. 853-863.

FLOR, J. M. **Propriedades mecânicas do concreto de alta resistência a baixas idades.** 1994. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, out. 1994.

GJORV, O. E. **Developments in the formulation and reinforcement of concrete.** Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2008.

GONDIM, F. L. **Estudo da interface entre o concreto e o material de reparo mediante microscopia**. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, ago. 2005.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: Pini, 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

NAWY, E. G. **Fundamentals of high-performance concrete**. 2. ed. New York: John Wiley, 2001.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

OLIVEIRA, L. A. R de. **Verificação do método de dosagem mais eficiente para o parâmetro e categoria analisados**. 2012. 123 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, jul. 2012.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

POLARI, D. A. B. M. O. **A influência das diferentes formas de sulfato de cálcio em argamassas de cimento Portland com uso de superplastificantes**. 2007. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, out. 2007.

RANA, N.; TIWARI, A.; SRIVASTAVA, A. K. High performance concrete and its applications in the field of civil engineering construction. **International Journal of Current Engineering and Technology**, Meerut, India, v. 6, n. 3, p. 982-985, jun. 2016.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 3. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015.

SILVA, J. S. da. **Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET)**. 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, abr. 2013.

SILVEIRA, R. G. da. **Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concreto com altos teores de cinza volante**. 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, fev. 2004.

TORALLES-CARBONARI, M. B. et al. Consumo de pasta em diferentes esqueletos granulares para concreto de alto desempenho. In: ENCONTRO TECNOLÓGICO DA

ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA, 4., 2003, Londrina. **Anais...** Londrina: ENTECA, 2003, p. 325-336.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.